
Bohr
y la teoría cuántica
Paul Strathern
SIGLO VEINTIUNO DE ESPAÑA EDITORES
LOS CIENTÍFICOS Y SUS DESCUBRIMIENTOS

Índice

Introducción

Según el gran físico teórico alemán Werner Heisenberg, «la influencia de Bohr sobre la física y los físicos de nuestro siglo ha sido mayor que la de ninguna otra persona, incluido Einstein». Y Heisenberg debía saber lo que decía, pues pasó buena parte de su vida debatiendo, y a veces discutiendo enconadamente con ambos.

El mayor logro de Bohr fue resolver el enigma de la estructura atómica mediante la aplicación de la teoría cuántica, con el resultado de grandes avances científicos y gran desconcierto entre los científicos. ¿Por qué? El caso es que nadie sabe aún qué es realmente la teoría cuántica.

El gran pianista Vladimir Horowitz dijo en una ocasión que Mozart era «demasiado fácil para los principiantes, demasiado difícil para los expertos». Lo mismo se aplica a la física cuántica según el colega y biógrafo de Bohr, Abraham Pais. Por ello, si incluso la versión simplificada contenida en este libro resultara desconcertante, al menos pueden consolarse pensando que algo es algo. Dicho de manera muy sencilla (para aquellos que encontramos demasiado difícil incluso al sencillo Mozart), la teoría cuántica postula que a nivel subatómico, las partículas no obedecen las leyes de la física clásica. De hecho, entidades tales como los electrones pueden existir como dos cosas diferentes a la vez, materia o energía, dependiendo de la forma en que se midan.

El principal problema de la teoría cuántica es que es sencillamente increíble.

No tiene nada que ver con el sentido común. Pero la ciencia del siglo XX es mucho más emocionante que el sentido común, que Einstein definió sensatamente como «la acumulación de prejuicios adquiridos hasta la edad de dieciocho años». Bohr fue director del Instituto de Física Teórica de Copenhague, desde donde prácticamente dirigió la era dorada de la física cuántica, que tuvo lugar en los años veinte e involucró a muchos de los mejores científicos jóvenes de la generación posterior a la de Einstein. Juntos y por separado, por medio de la discusión y de la brillantez individual, estos pioneros abrieron un campo cuya existencia ni se sospechaba un cuarto de siglo antes. Las consecuencias de esta época de descubrimientos han sido de diverso valor. Ahora sabemos cómo funciona nuestro mundo, desde las más minúsculas partículas subnucleares a los agujeros negros. También podemos

destruirlo en un holocausto nuclear. Bohr vivió lo suficiente para contribuir a la construcción de la primera bomba atómica. Cuando se dio cuenta de lo que había hecho, pasó el resto de su vida haciendo campaña contra la bomba.

Capítulo 1
Vida y obra

Niels Bohr nació el 7 de octubre de 1885 en Copenhague, en el seno de una distinguida familia danesa. Su padre, Christian Bohr, era profesor de fisiología en la Universidad de Copenhague, y casi ganó el premio Nobel por sus trabajos pioneros sobre la química del sistema respiratorio. Sin embargo, su impronta más duradera en la sociedad danesa se debió a su amor por Inglaterra y todo lo inglés.

Christian Bohr era un gran creyente en el fútbol, y jugó un papel misionero en la propagación de esta religión popular en Dinamarca. La madre de Niels, Ellen, era de origen judío, y venía de una familia prominente en los círculos bancarios y políticos.

Pese a su nombre, Bohr padre no era un hombre religioso, y la atmósfera familiar era progresista, liberal e intelectual. Según todos los testimonios, los Bohr eran una familia agradable, comprensiva y tolerante. Uno tras otro sus amigos recordarían más tarde lo agradables, comprensivos y tolerantes que eran. Suena demasiado bonito para ser verdad, o demasiado aburrido; resulta difícil decidir cuál de las dos cosas.

Prácticamente la única anécdota que conocemos de la infancia de Niels es, como es usual, poco reveladora. Un día Christian Bohr mostró un árbol a su pequeño, explicándole de qué manera tan bella el tronco se dividía en ramas, que luego se dividían en ramas más finas, de las que luego salían hojas. Se dice que la respuesta de Niels fue: «Sí, pero si no fuera así no habría árbol». Desde el punto de vista psicológico y simbólico, así como literal, esto no dice prácticamente nada. O por el contrario, podemos pensar que rebosa de toda clase de significados. Escojan ustedes: es todo lo que tenemos.

Después de una infancia en blanco y una sosa juventud, Niels se convirtió en un joven callado y tímido. Las fotos de la época muestran a un adolescente alto y bien vestido, pero de aspecto algo torpe, con el cuello almidonado y cara de pocos amigos. Sus rechonchos mofletes cuelgan, sus labios son gruesos, y hay un aire de culpa en sus ojos pequeños y algo juntos. Hablaba de forma titubeante, y poco había en sus maneras que pareciera indicio de una mente de primer orden. En la escuela era otra historia. Era un alumno aventajado, aunque no brillante, muy

dispuesto a hacer uso de su tamaño si se trataba de pelear. No tardó en ser conocido por su fuerza, testarudez y aptitud para los deportes. Para orgullo de su padre, fue seleccionado para el equipo de fútbol del colegio. Siguiendo los pasos paternos, se interesó por la ciencia. Le atraía en particular el trabajo experimental de laboratorio, en el que consiguió combinar una habilidad excepcional con una natural torpeza. Destrozar tubos y recipientes de cristal era su especialidad. En cierta ocasión, al oírse una serie de explosiones procedentes del laboratorio, su profesor, ya curado de espanto, comentó: «Ese debe de ser Bohr».

Pero lo más importante en la vida de Bohr era, con mucho, su hermano menor Harald, quien ingresó con él en el prestigioso Gammelhom Gymnasium de Copenhague. Un compañero dijo de ellos: «Nunca había visto dos personas tan compenetradas». Los hermanos eran inseparables. Harald era año y medio menor que Niels, pero no tardó en alcanzar a su avispado y deportivo hermano.

Niels no dio muestra alguna de resentimiento por ello. Para cuando estaban terminando la escuela, el joven Harald sobrepasaba ya a su hermano en todos los frentes. No sólo era un matemático brillante, sino también un excelente futbolista. Como elegante mediocampista, Harald no tardó en superar las ocasionales gestas acrobáticas de su hermano en la portería. Desde el principio el joven Harald fue el hermano vivaz e ingenioso, mientras que el estilo de Niels era más callado y prosaico. Pese a tales rivalidades y diferencias de temperamento, el profundo entendimiento entre los dos hermanos no fue perturbado. Nunca tuvieron diferencias.

O eso se nos ha hecho creer. Bohr se ha convertido en monumento nacional en Dinamarca, y el ser humano de carne y hueso ha quedado aplastado bajo el sólido edificio de la leyenda Bohr. Resulta difícil creer que no hubiera alguna tensión oculta en esta relación fraterna inusualmente estrecha. Pocos hermanos mayores ceden su papel estelar sin alguna muestra de resentimiento, pero al parecer los dos hermanos se acomodaron el uno al otro con extraordinaria sensibilidad e intuición psicológica. Se repartieron entre los dos el campo del conocimiento científico. Harald se encargó de las matemáticas, mientras que Niels se dedicó a la física. De este modo podían consultarse el uno al otro e incluso ayudarse sin rivalidad alguna.

Asimismo, el portero ocupa una posición única en el equipo, que no se ve amenazada por ningún otro jugador por brillante que sea.

Incluso en el seno del hogar parece que la relación de los Bohr estuvo libre de los piques y puñetazos habituales en los afectos fraternales normales. Este cuadro idílico se completa con su hermana mayor Jenny, igualmente brillante.

Estudió en la Universidad de Copenhague y en Oxford, para luego regresar a Dinamarca y convertirse en una profesora «inspiradora» conocida por su «calidez». Pese a esta «calidez» nunca se casó, y sabemos, tristemente, que «los nervios le dieron problemas más adelante». La verdad no es tan agradable. La amada hermana y primogénita de la familia Bohr se convirtió en una ruina psicológica incurable, y acabó encerrada en un manicomio provincial. Según su certificado de defunción murió de «psicosis maniacodepresiva en su fase maníaca», fórmula clínica evocadora, a su pesar, de algo escalofriante. Como admitiría Harald en su funeral: «desde su más temprana juventud se veía impedida, a menudo impotente, por un mal que consumía todas sus fuerzas». La presencia de una figura tan inquietante en el hogar familiar de los Bohr arroja una luz algo diferente sobre la relación inusualmente cercana entre Niels y Harald.

Esta insistencia sobre una dimensión psicológica en la relación entre Niels y su hermano no es gratuita. Seguro que no es casual que la obra posterior de Niels se caracterizara por su esencial ambigüedad. La teoría cuántica trata de la compatibilidad de dos opuestos aparentemente irreconciliables. Dos de las concepciones teóricas más importantes de Niels fueron la *Teoría de la Correspondencia* y el *Principio de Complementariedad*, los cuales se concentran en la semejanza a pesar de las diferencias subyacentes. Niels Bohr comprendía la noción de ambigüedad al más profundo nivel, y su gran obra científica buscaba resolverla en armonía.

En 1903 ambos hermanos entraron en la Universidad de Copenhague. Era una época estimulante. Empezaba un nuevo siglo, y el mundo estaba a punto de cambiar hasta lo irreconocible. Ese mismo año aparecieron los primeros taxis motorizados en las calles de Copenhague. En Estados Unidos los hermanos Wright realizaban su primer vuelo, y Marie Curie recibía el premio Nobel por el descubrimiento de la radiactividad.

Los dos Bohr entraron pronto en el equipo de fútbol universitario, el Akademisk Boldklub, uno de los equipos más fuertes del país. Después se conocería con el nombre de AB, y hoy día suele figurar aun en los primeros puestos de la liga danesa. Niels se lucía de vez en cuando en la portería, pero cuando el juego se desarrollaba en el extremo opuesto del campo solía pasar el tiempo haciendo cálculos a lápiz sobre los palos de la portería. Ciertamente, fue su absorción en estos empeños matemáticos, tanto como la pericia artillera de sus oponentes, lo que le llevó a hacer algunas de sus paradas más espectaculares. Harald, por otra parte, brillaba sin necesidad de tales ayudas, y acabó jugando más tarde para Dinamarca en los juegos olímpicos (en los que ganaron a Francia en semifinales por 17-1, para luego caer ante Inglaterra por 2-0).

A estas alturas los bien avenidos y simbióticos hermanos se inspiraban (o empujaban) mutuamente hacia su pleno potencial intelectual. El temperamento parsimonioso de Niels parecía ideal para las complejidades de la física, y sus logros en el campo de su elección empezaban a igualar a los de Harald en matemáticas. Incluso sus compañeros de estudios empezaban a emplear la palabra «genio» al referirse a cualquiera de los hermanos Bohr. Niels fue siempre un ávido lector, y hacía lo posible por estar al tanto de los últimos avances científicos. Se ganó un nombre enseguida entre sus compañeros por hacer enmiendas a los libros de texto de física. Lo que decían era erróneo, simplemente, y él era capaz de demostrarlo con ayuda de la evidencia de los recientes descubrimientos.

Durante sus años de estudio los Bohr siguieron viviendo en el hogar familiar, al cual su padre invitaba regularmente a cenar a algunas de las mentes más lúcidas de Dinamarca. Copenhague no era ya un remanso provinciano. Entre la anterior generación de intelectuales estaban Soren Kierkegaard, fundador del existencialismo, y el crítico George Brandes, el hombre que descubrió a Nietzsche. Después de cenar Bohr padre y sus colegas intelectuales celebraban una tertulia filosófica, a la que Niels y Harald podían asistir como «oyentes silenciosos». (Sería quizás un hogar de ideas avanzadas, pero parece que hasta los hijos mayores debían ser vistos pero no oídos.)

En 1907, durante su último año de carrera, Niels Bohr ganó la medalla de oro de la Real Academia Danesa de Ciencias y Letras por un ensayo sobre la tensión

superficial del agua. Era una gesta asombrosa para un estudiante, y marcó su primera aparición como superintelecto científico. Bohr completó los trabajos experimentales para este ensayo robando tiempo de estudio de sus exámenes finales, y casi se le pasa el plazo fijado por la Academia. (En el manuscrito se aprecia que algunas partes las copió apresuradamente Harald, suponemos que a partir de las notas de Niels.) La parte experimental requería un análisis preciso de las vibraciones de un chorro de agua. Cada uno de los experimentos fue ideado y llevado a cabo por Bohr en solitario, y precisaba un chorro de agua con un radio diminuto, inferior al milímetro. Para conseguirlo necesitó largos tubos de cristal de similares proporciones y de corte transversal elíptico, que él mismo fabricó. La velocidad del agua se medía cortando el chorro dos veces en el mismo punto en un intervalo de tiempo dado, y luego midiendo la longitud del segmento cortado por medio de fotografías. Las vibraciones (las ondas que se forman sobre la superficie del agua) se medían también con ayuda de fotografías.

Había que realizar la mayor parte de los experimentos de madrugada, con las calles vacías, con el fin de evitar la menor vibración perturbadora procedente del tráfico.

Este habría de ser el único trabajo experimental original que Niels Bohr realizara completamente en solitario. Tiene todas las trazas de su proceder parsimonioso y preciso y de su brillante capacidad de análisis, junto con una ausencia casi milagrosa de gazapos. Hasta Bohr se dio cuenta de que se trataba de una excepción. La tensión de trabajar con cristales tan frágiles le pasó factura, evidentemente, y en adelante siempre utilizaría colaboradores físicamente aptos en sus experimentos.

Es cosa sabida hace tiempo que estar obligado a escuchar sin poder replicar es un estimulante para el pensamiento radical. El forzoso silencio de Bohr en las discusiones filosóficas vespertinas de su padre no fue una excepción. Empezó a pensar por sí mismo. En contraste con las discusiones eruditas que debía de oír en silencio, el pensamiento filosófico de Bohr fue asombrosamente original desde el comienzo. De hecho, incluso anticipa ciertos aspectos del pensamiento de Wittgenstein. A Bohr le llamaba la atención el modo en que una palabra se puede emplear para describir un estado de conciencia («borrachera», por ejemplo) y a la vez utilizarse para describir el comportamiento externo que acompaña a este estado

interno. Se dio cuenta de que cuando una palabra se refería a la actividad mental era esencialmente ambigua. (Aquí apareció por primera vez el concepto de ambigüedad en el pensamiento de Bohr. De modo revelador, es un concepto tan profundo como irresoluble.) En un intento de resolver esta ambigüedad, Bohr trazó una analogía con las matemáticas. Comparó estas palabras ambiguas (tales como borrachera, enfado, alegría, etc.) con funciones de valor múltiple. Dicho de un modo muy simple, estas funciones pueden tener valores diferentes en el mismo punto, ambigüedad que se supera especificando a qué «plano» se refiere el valor. Imaginen un eje tridimensional:

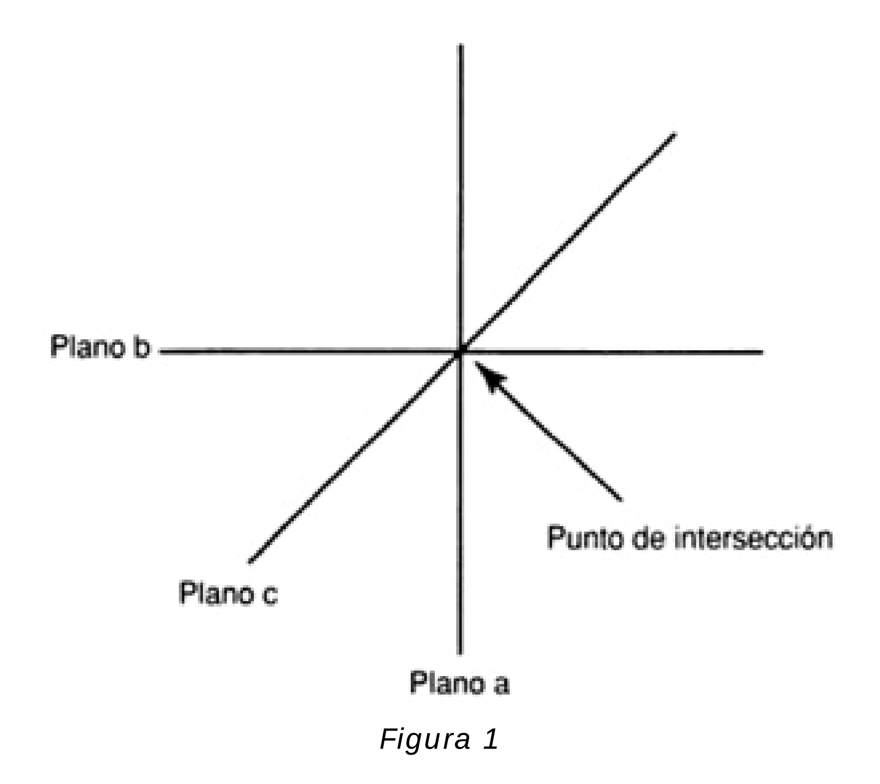


Figura 1

Si el punto de intersección puede tener tres valores diferentes, podemos superar esta complicación asignando cada valor a un plano diferente, a, b ó c. Bohr sugirió que este método puede usarse también para el problema filosófico de las palabras ambiguas. Si una palabra tiene significados diversos, podemos superarlo nombrando el «plano de objetividad» al que se refiere. Por ejemplo, «borrachera» podía referirse a confusión mental o a falta de coordinación física, dos cosas

diferentes. Especificando el «plano de objetividad» al que la palabra se refiere (en este caso, «subjetivo» u «objetivo») podemos eliminar la ambigüedad.

La historia está plagada de vanos intentos de las grandes mentes científicas (y filosóficas) por reducir el lenguaje a una estructura lógica precisa, pero como todos sabemos a nuestra costa, la conversación rara vez es un procedimiento lógico. (El gran filósofo-científico alemán del siglo XVII Leibniz ingenió un esquema que reducía todos los argumentos morales a valores matemáticos: al final de la discusión se sumaban los puntos y el que tenía más ganaba. Si la vida fuera tan simple como la ven los genios...). La sugerencia de Bohr era igualmente ingeniosa, y estaba igual de condenada. Se vio forzado a aceptar que tales ambigüedades eran inherentes al lenguaje. Empezaba a comprender cómo unas interpretaciones conflictivas podían existir simultáneamente. (Noción que parece prefigurar la teoría cuántica, misteriosamente, como se puede ver consultando la definición simplificada y en cursiva de la introducción).

Estas incursiones filosóficas suelen resultar desastrosas para los científicos.

La filosofía se ocupa de cómo son las cosas, y la ciencia de cómo funcionan. En otras palabras, la ciencia ignora a la filosofía y va a lo suyo. Pero hay momentos en los que hasta la ciencia tiene que hacer limpieza y preguntarse qué demonios está haciendo. El comienzo del siglo XX fue uno de esos raros momentos.

Hubo otro en el siglo XVII, cuando Galileo sugirió que la ciencia tenía que adaptarse a la realidad, no a las meras ideas. La verdad se obtenía a través de la experiencia, no solo del pensamiento. Este método alcanzó su apogeo con los grandes descubrimientos científicos del siglo XIX, pero al llegar el XX, parecía de algún modo insuficiente. Las limitaciones del empirismo estaban quedando al descubierto. La más flagrante de ellas se puso de manifiesto en 1905, cuando Einstein postuló su Teoría Especial de la Relatividad.

Contrariamente al concepto de ciencia hasta entonces imperante, la relatividad *fue* descubierta gracias al pensamiento. (Einstein se sirvió de la matemática, no de la experimentación).

Había algo realmente nuevo en el ambiente. La ciencia cuestionaba sus métodos y a sí misma. ¿Qué era? ¿Qué hacía? El interés de Bohr por la filosofía hallaba eco en muchas mentes científicas destacadas de la época. (Einstein leía al filósofo escocés

del siglo XVIII Hume, quien cuestionaba la noción de causa y efecto; otros estudiaban al filósofo alemán del XIX Kant, cuya epistemología trataba de explicar la naturaleza del espacio y el tiempo). La ciencia estaba pasando la prueba de la filosofía, y de ello saldrían los fundamentos de la mayor edad científica de todas: el siglo XX.

El espectáculo de la ciencia volviendo sobre sí misma era emocionante en extremo.

Todo quedaba en entredicho. El filósofo y científico vienes Ernst Mach (quien dio nombre a la velocidad de la barrera del sonido) llego al extremo de cuestionar la existencia del átomo. Casi medio siglo antes, el ruso Mendeleyev había revolucionado la ciencia con su Tabla Periódica de Elementos Atómicos. ¿Acaso se basaba en un supuesto falso? ¿Qué era exactamente un átomo? ¿Alguien había visto alguno? Según Mach el átomo no era más que un concepto desfasado, un vestigio de un modo de pensar anterior y acientífico. La ciencia estaba cargando con una idea abstracta e insignificante, jamás constatada por nadie. Ya no había nada sagrado. Hasta las nociones más básicas se podían cuestionar. Bohr empezó pronto a hacer exactamente eso. En 1909 emprendió su tesis doctoral, que resultó ser un trabajo puramente teórico sin que el autor introdujera el componente de la experimentación y que le llevó a una conclusión demoledora. (Quizá decidió que era mejor dejar el trabajo experimental demoledor en manos más expertas). El título de la tesis de Bohr fue «Investigación de la Teoría del Electrón en los Metales» (*Studier over metallernes elektrontheori*). Bohr rechazaba la postura extrema de Mach. El átomo no solo existía, sino que empezaba a comprenderse algo acerca de su naturaleza. Para los años finales del siglo XIX la mayoría de los científicos (¡pero no Mach!) consideraban el átomo como la forma fundamental de la materia.

De hecho, su mismo nombre en griego significa «sin partes», es decir, indivisible. Entonces, en 1897, el físico británico J. J. Thomson descubrió el electrón, la primera partícula subatómica conocida. El electrón tenía una carga eléctrica negativa. Todo parecía indicar que el átomo tenía una estructura interna. Thomson sugirió que el átomo era como un pastel esférico de carga eléctrica positiva, con electrones pegados a modo de pasas, suficientes para neutralizar dicha carga.

El cuadro cambió un poco cuando tocó explicar cosas como el magnetismo de los metales. Según la teoría del electrón en los metales, un metal podía concebirse como un gas de electrones en medio de una red espacial de iones de carga positiva.

En estos primeros días en los que nadie sabía exactamente de qué estaba hablando, un ion se definía de una manera circular, reminiscencia de Alicia en el País de las Maravillas, como «un átomo que ha perdido sus electrones».

Se elaboraban teorías provisionales sobre teorías provisionales. Había un sentido en lo que decía Mach. ¿Cuál era el fundamento de todas estas teorías, si nadie había visto un átomo?

Sin preocuparse de semejantes rigores, Bohr siguió avanzando por lo desconocido a golpe de teoría. En su tesis argumentaba, con un análisis parsimonioso y preciso, que el magnetismo revelaba deficiencias en la teoría del electrón en los metales. La respuesta obvia era cuestionar dicha teoría, pero Bohr escogió un camino completamente diferente. Aquí atisbamos por primera vez la asombrosa originalidad y valor de su pensamiento. Bohr argumentó como sigue: la teoría del electrón en los metales explica casi todas las cualidades mostradas por los metales. El problema empieza cuando hay que explicar algo acerca de las *cantidades* implicadas en el comportamiento metálico. Por ejemplo, cuando se colocan ciertos metales en un campo eléctrico, la fuerza de su magnetismo (que depende de los electrones) no concuerda con las leyes de la física clásica. ¿Pero qué demonios quería decir esto? Bohr hizo una conjetura asombrosa. Al parecer, los viejos supuestos de la física clásica no encontraban aplicación a nivel subatómico. Para describir lo que sucede dentro del átomo parecía necesario un tipo de física completamente diferente.

Pero esto era imposible. Era como si Bohr sugiriera que en el nivel subatómico las cascadas fluyen hacia arriba y las hadas existen. He aquí un País de las Maravillas donde dos y dos no son necesariamente cuatro. Ni el propio Bohr estaba seguro de lo que significaba todo esto. Así que decidió dirigirse a la fuente. Cuando terminó su tesis en 1911 fue a Cambridge a estudiar con J. J. Thomson. Si alguien sabía algo sobre el comportamiento de los electrones, debía ser su descubridor. Pero en Cambridge se encontró con un muro de ladrillo, en parte obra suya, pero no del todo. A Thomson simplemente no le interesaba este danés imperioso y entusiasta, que ni siquiera sabía expresarse con propiedad en inglés, menos aún expresar sus

complicadas teorías. A Bohr no le favoreció su imperfecto uso de la terminología. Al hablar de electricidad, por ejemplo, decía «cargamento» en lugar de «carga».

(Bohr hablaba con fluidez danés y alemán, pero por lo demás era un lingüista más entusiasta que experto. Mucho más tarde insistiría en saludar al embajador francés con un cordial «Aujourd'hui!»). El punto más bajo de su experiencia en Cambridge tuvo lugar durante una discusión informal con Thomson y sus colegas.

Bohr trataba de explicar lo mejor que podía cierto punto de la teoría del electrón en los metales. Thomson le interrumpió diciéndole que lo que decía eran paparruchas, y a continuación dijo exactamente la misma cosa con palabras diferentes. Bohr no se puso las cosas más fáciles cuando más adelante insistió en que algunos de los cálculos del gran hombre para el electrón eran defectuosos. «Todos han perdido la confianza en mí» escribió a casa en tono desamparado. Pero estaba dominado por la testarudez del genio. Parecía claro que había otro tipo de física que contradecía las leyes de la física. No tenía ni idea de adónde conducían sus ilógicas ideas, pero estaba decidido a perseverar y seguirlas.

Bohr se dio cuenta de que tenía que aprender bien el inglés, así que con su característica perseverancia se sentó a leer las obras de Charles Dickens con la ayuda de un gran Engelsk-Dansk Ordbog. Buscando cada palabra que no entendía, empezó a abrirse camino entre descripciones de comportamientos más extraños aún que el de los electrones: las manías de la Inglaterra victoriana tal como se describen en *Los Papeles de Pickwick, Oliver Twist* y *Martin Chuzzlewit*.

Entonces vino el golpe de suerte de Bohr. En octubre de 1911 asistió a la cena anual de Cavendish, celebrada en honor del excéntrico físico inglés del siglo XVIII, el primero en calcular el peso de nuestro planeta, importante muestra de eclecticismo que determinó el valor de G, la constante gravitacional. Tras la cena, con el oporto, Ernst Rutherford se dirigió a los presentes. Su trabajo sobre la radiactividad había conducido a especulaciones revolucionarias sobre la naturaleza y estructura del átomo. Bohr quedó fascinado con este neozelandés campechano de mediana edad a quien uno de sus colegas describió como «una mezcla encantadora de niño, hombre y genio». Quizá el hecho de que el padre de Bohr hubiera muerto prematuramente unos meses antes tenga alguna relación con ello.

Rutherford estaba igualmente impresionado con Bohr. Le gustaban los hombres activos, y le impresionó saber que Bohr era un futbolista de categoría profesional. Fiel al tópico kiwi, Rutherford había sido un robusto jugador de rugby en el equipo de su facultad de Cambridge. Más importante aún, Rutherford entendía lo que Bohr tenía que decir, a pesar de su inglés, que siguió siendo tortuoso y titubeante cuando tenía que expresar ideas científicas complejas que fueran más allá del registro de Mr. Pickwick («Engelsklish», fue como lo llamó un amigo). En opinión de Rutherford: «Este joven danés es el tipo más inteligente que he conocido nunca». Menuda flor, viniendo de uno de los físicos más grandes de su época. La valía de Bohr empezaba a ser reconocida por fin. Rutherford le invitó a trabajar en su equipo en la Universidad de Manchester. Bohr aceptó entusiasmado y escribió a casa: «En Manchester tendré condiciones estupendas». Aunque Bohr y Rutherford llegaran a un entendimiento tan inmediato, en realidad eran opuestos. Rutherford era el físico práctico por excelencia, y pese a su estilo tan franco y directo era capaz de concebir experimentos de extrema sutileza. Exigía pruebas incontestables, y despreciaba a los teóricos de altos vuelos que no se dignaban ensuciarse las manos con el material de laboratorio. Bohr, por su parte, venía más bien de la tradición francesa y alemana. Prefería someter las hipótesis a un riguroso análisis lógico con el fin de descubrir sus implicaciones, y no temía nunca construir teoría sobre teoría. A estas alturas la razón continental prevalecía sobre el empirismo británico en el enfoque de Bohr. Por una vez, no parecía importarle a Rutherford. «Bohr es diferente. Juega al fútbol», dijo a sus colegas en su defensa.

Las investigaciones de Rutherford sobre la radiactividad le habían llevado a algunas conclusiones extrañas. Había descubierto que los átomos se desintegran.

Los átomos de un elemento dado pueden desmoronarse y convertirse en átomos de otro elemento distinto. Conclusiones como esta eran tomadas a broma sin más por los físicos clásicos de la vieja escuela. Para ellos se trataba ni más ni menos que de una regresión a la alquimia medieval y a su creencia de que el vil metal podía convertirse en oro. Rutherford decidió investigar la estructura interna del átomo, y preparó una serie de experimentos en colaboración con su ayudante alemán Hans Geiger, inventor del contador que lleva su nombre, utilizado para medir la radiactividad. Rutherford estaba de acuerdo en lo esencial con la imagen que tenía

Thomson de la estructura atómica: un pastel esférico uniformemente positivo con pasas-electrones negativos pegados. Pero su trabajo experimental sobre la descomposición radiactiva de los átomos le había llevado a visualizar el pastel más bien como una esfera de gas positivo claveteada de diminutos electrones.

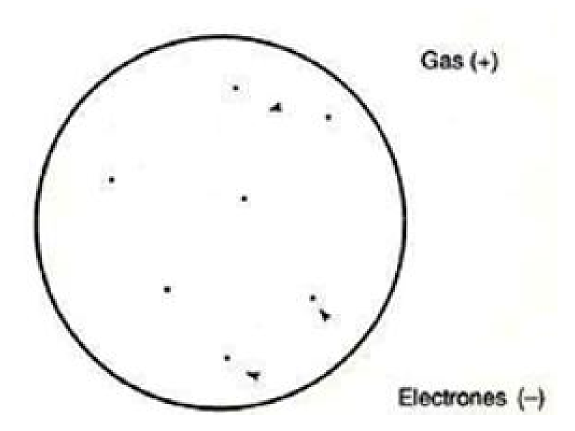


Figura 2. Modelo inicial de la estructura atómica de Rutherford

Rutherford se dio cuenta de que la única manera de investigar algo tan minúsculo como un átomo era bombardearlo con algo todavía más pequeño, es decir, con una partícula subatómica. Por suerte, sabía que cuando los átomos radiactivos se desintegran en otros menores emiten un flujo de partículas subatómicas. Decidió utilizar un tipo determinado de estas, llamadas partículas alfa. Son mucho mayores que los electrones, y tienen carga positiva. Rutherford montó un experimento en el que una fuente radiactiva disparaba un chorro de partículas sobre una delgada lámina de oro. Cuando las partículas atravesaban el oro impactaban en una pantalla fluorescente y producían pequeños destellos.

A Rutherford no le sorprendió que la mayor parte de las partículas alfa atravesaran la lámina de oro, pues suponía que los átomos eran en su mayor parte gas. En ocasiones se desviaban algunas partículas alfa, cosa que evidentemente ocurría cuando se cruzaban en su trayectoria con uno de los diminutos electrones de la esfera atómica gaseosa. Los electrones eran tan pequeños que solo desviaban a las grandes partículas alfa en 1°, aproximadamente. Según avanzaba el experimento, le sorprendió descubrir que algunas partículas se desviaban tanto como 10º.

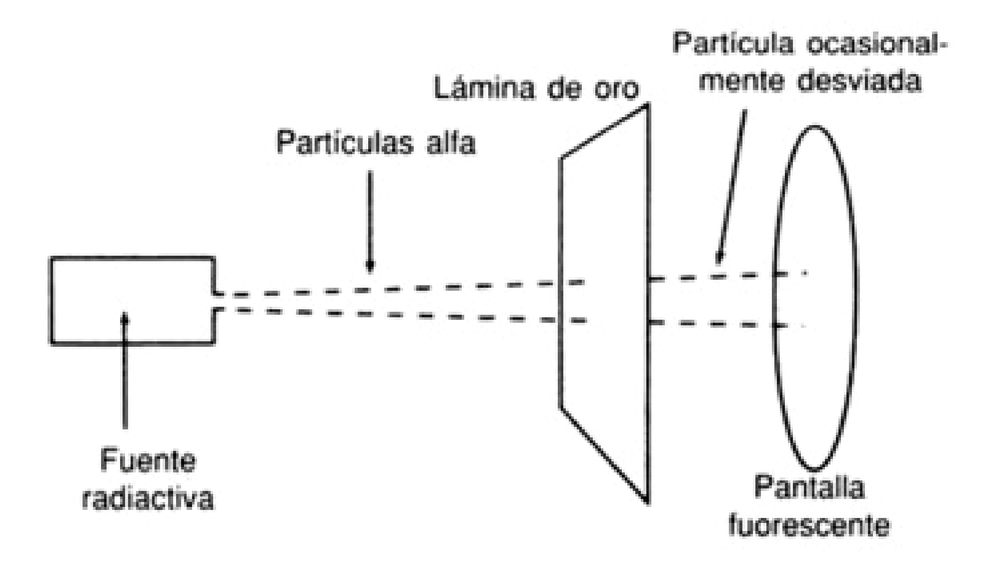


Figura 3

¿Pero cómo podía ser, si las partículas alfa disparadas eran enormes en comparación, iban a gran velocidad y los electrones eran tan pequeños? Unos días más tarde ocurrió algo aún más asombroso. Se comprobó que algunas de las partículas rebotaban hacia atrás tras golpear en la lámina de oro. «Puedo decir que fue el acontecimiento más increíble de mi vida» comentó Rutherford.

«Era casi tan increíble como disparar un obús de treinta y ocho centímetros contra un pañuelo de papel y que rebotara, volviendo hacia ti».

¿Qué demonios estaba pasando? ¿Qué cosa podía ser capaz de detener, y hacer rebotar una partícula subatómica con semejante cantidad de movimiento? No le llevó mucho tiempo a una cabeza como la de Rutherford ofrecer una respuesta. El átomo tenía que estar formado por un diminuto pero extremadamente concentrado centro con carga positiva. Este podría así soportar la cantidad de movimiento de la partícula positiva alfa y también repelerla, como sucede con los dos extremos positivos de un par de imanes. Ahora Rutherford podía presentar un modelo del átomo. Según su concepción, el átomo estaba casi completamente vacío. En el centro hay un núcleo minúsculo pero extraordinariamente denso, que ocupa una milmillonésima parte del espacio del átomo —imaginen un guisante en una catedral. Este núcleo positivo está rodeado por una cierta cantidad de electrones negativos que giran a su alrededor en órbitas fijas, atrapadas por su poder de atracción.

Había nacido el átomo nuclear, al que habrían de seguir la física y la era nucleares. Era una de las ideas estéticamente más reconfortantes que la ciencia haya concebido nunca. Parecía que la unidad más pequeña del mundo funcionaba igual que el sistema solar. ¡El micromundo y el macromundo eran reflejo el uno del otro! La concepción de Rutherford era inspirada. Tenía una sola pega: no funcionaba.

Según las leyes de la física clásica los electrones en órbita simplemente irradiarían toda su energía en un milisegundo y colapsarían contra el núcleo.

Además, ¿qué impedía a las partículas positivas que componen el núcleo repelerse unas a otras (de nuevo, como ocurre con los imanes)? Un núcleo central compuesto de partículas positivas se disgregaría en el acto. Estas cuestiones no tenían respuesta. La estructura atómica de Rutherford era inestable.

Bohr pensaba de otro modo. Nada dispuesto a dejarse desanimar por las leyes de la ciencia, Bohr se propuso hallar una solución que apoyara la estructura atómica «imposible» de Rutherford. Bohr estaba convencido de que el modelo «sistema solar» del átomo era demasiado bueno para ser mentira. Explicaba tantas cosas hasta entonces inexplicables. Bohr fue uno de los primeros en percatarse de ello.

Cada elemento de la Tabla Periódica tiene un número atómico, que indica su posición en la tabla y por tanto sus propiedades. Este número, estrechamente relacionado con el peso, refleja obviamente el número de unidades de carga eléctrica positiva que hay en el núcleo. Este sería, por lo general, igual al número de electrones negativos en la órbita del núcleo. Las propiedades físicas y químicas de un átomo dependen evidentemente de las órbitas de dichos electrones. Su facilidad para tomar o desprender electrones dependería de la posición de la órbita. Diferentes tipos de órbita podían incluso explicar cómo había diferentes elementos, y cómo sus propiedades recurrían como lo hacían en la Tabla Periódica. Caramba, el modelo de Rutherford lo explicaba *todo. Tenía* que ser correcto — ¡aunque supusiera negar las leyes de la física! Después de todo, Bohr ya las había cuestionado en su tesis sobre la teoría del electrón en los metales.

Para explicar cómo Bohr se las arregló para resolver este problema aparentemente insuperable, primero es necesario comprender exactamente cuáles eran las leyes de la física. En esta época (alrededor del cambio de siglo) las leyes de la física se basaban en los supuestos fundamentales de la física clásica, es decir, de la visión

científica del mundo desarrollada principalmente por Galileo, Newton, y más tarde, Maxwell. Dicha visión consideraba el Universo como una máquina vasta y compleja que operaba siguiendo principios estrictamente mecánicos, en tiempo absoluto y espacio absoluto. Todo movimiento del Universo tenía una causa. La secuencia de causa y efecto era rígida e inmutable. Todo estaba determinado (y era, por tanto, explicable). Había dos formas de energía: la que poseían las partículas en movimiento, y la que viajaba en forma de ondas (como la luz, las ondas de radio, etc.). El comportamiento de la primera se asemejaba a bolas de billar chocando, el de la segunda a las olas desplazándose sobre la superficie del mar. Estas dos formas de energía eran mutuamente excluyentes. Como explica la teoría de la gravedad de Newton, los cuerpos se atraen unos a otros según su masa y la distancia que los separa. Y como explica la teoría de las ondas electromagnéticas de Maxwell, la luz se desplaza en forma de ondas, cuyas diferentes frecuencias producen tipos diferentes de radiación (por ejemplo, diferentes colores). La veracidad de estas leyes y supuestos básicos de la física clásica estaban por encima de toda duda. Esta era la manera cómo funcionaba el mundo, sin más. ¿Y quién podía negarlo? Desde que Galileo sentara las bases de la física clásica en el siglo XVII, el resultado había sido una era de avances científicos sin paralelo en la historia. El mundo en el que las brujas ardían en la hoguera y la Tierra era el centro del Universo había dado paso a los primeros rascacielos de Chicago, el primer vuelo de los hermanos Wright, la gravedad, la electricidad, el motor de combustión, la velocidad de la luz; todo lo había explicado la física clásica. O eso parecía. Hacia el final del siglo XIX este monolito de certeza había empezado a tener fisuras que solían atribuirse al cada vez más rápido pero desigual avance del saber científico. Se confiaba en que futuros descubrimientos curarían estos ataques de hipo.

Entonces, en 1900, el profesor de física de la Universidad de Berlín, Max Planck, hizo un descubrimiento asombroso. Como explicó a su hijo en una fría mañana de diciembre mientras paseaban por un bosque cercano: «Hoy he hecho un descubrimiento tan importante como el de Newton... he dado el primer paso hacia adelante respecto a la física clásica». ¿Pero qué había descubierto exactamente? Una de las anomalías que había desconcertado a los físicos clásicos era la llamada «catástrofe ultravioleta». Sucede lo siguiente: un cuerpo negro absorbe todas las

frecuencias de la luz, de modo que al calentarse debería irradiar en todas las frecuencias, pero no lo hace. Emite frecuencias bajas, que solo aumentan de forma gradual a medida que aumenta la intensidad del calor. Como todos sabemos, un cuerpo caliente emite luz roja de baja frecuencia. Si se calienta más, emite una luz naranja de frecuencia superior, y luego, amarilla.

Pero según las leyes de la física clásica debería emitir cantidades iguales de *todas* las frecuencias de la luz. Si esto *ocurriera* sufriríamos graves quemaduras por las altas frecuencias de luz ultravioleta cada vez que nos sentáramos delante de un fuego. La «catástrofe ultravioleta» simplemente no ocurría.

Planck había conseguido averiguar lo que *sí* tenía lugar. Pero para hacerlo se había visto obligado a contradecir las leyes de la física clásica. Decidió que la radiación electromagnética (la luz) se comportaba como las ondas y como las partículas. A estas ondas-partículas las llamó «quanta» (palabra latina que significa « ¿cuántos?»).

Según Planck, la radiación electromagnética de baja frecuencia (luz) se compone de pequeños cuantos, y la radiación de frecuencia más alta de cuantos mayores.

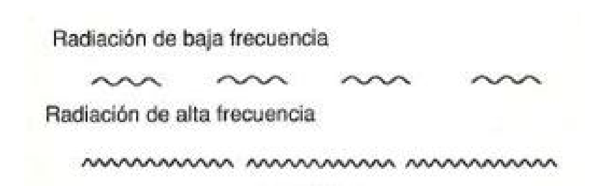


Figura 4

Cuando se calienta un cuerpo, con una cantidad de energía (calor) comparativamente pequeña se pueden formar los cuantos menores de los que se compone la luz roja de baja frecuencia. Para formar cuantos mayores se requiere una cantidad de energía mayor, y por ello solo irradian en la medida en que aumenta el calor, y aun así, serán pocos en un principio.

Recapitulando: ¿por qué los cuantos tienen que ser ondas y partículas? La luz tiene frecuencia, luego debe viajar en forma de ondas. ¿Pero cómo explicar la ausencia de la catástrofe ultravioleta? Planck sugirió que las ondas no eran continuas (como deberían ser, según la física clásica). En lugar de ello eran cuantos, es decir, haces de ondas u objetos emitidos en forma de partículas individuales. Los cuantos de

cada frecuencia de luz tienen diferentes tamaños físicos (cualidad de materia), y eso explica que inicialmente el rayo ultravioleta no sea emitido con tanta intensidad. Los cuantos son por tanto ondas que se desplazan como partículas, y partículas consistentes en ondas. Imposible, según la física clásica, en la que las ondas son continuas y las partículas se componen de materia, no de ondas. (En esta concepción, las ondas son meras oscilaciones con una determinada frecuencia que pasan *a través* de un medio o sustancia, como las olas pasan *a través* del agua). Planck dedujo que el tamaño de los cuantos variaba en proporción a la frecuencia de la radiación. Lo expresó en su famosa fórmula:

$$E = hv$$

en la que *E* es el valor energético del cuanto y *v* la frecuencia de la radiación
La *h* es una constante fundamental ahora conocida como la constante de Planck.
(Una constante fundamental es una cantidad física que puede expresarse en forma numérica y que es siempre la misma bajo cualesquiera condiciones, en cualquier lugar del Universo. Otro ejemplo de constante fundamental es la velocidad de la luz. El valor de la constante de Planck se ha calculado en 6.626176×10^{-34}julios. Una suma minúscula, casi cero. Pero el solo hecho de que sea *más que* cero supone que los cuantos de alta frecuencia requieren más energía, y eso es lo que nos salva de la «catástrofe ultravioleta»). La idea de Planck era tan revolucionaria que al principio nadie podía aceptarla.
Él mismo la encontraba difícil de creer. Cinco años después Einstein confirmó la «teoría cuántica» de Planck, como vino a llamarse, al emplearla para explicar el efecto fotoeléctrico, otra anomalía desde el punto de vista físico clásico. Este efecto tiene lugar cuando la luz ultravioleta alcanza a ciertos metales, provocando una emisión de electrones. Estos electrones no se comportan de acuerdo con las leyes de la física clásica. Su nivel de emisión depende de la frecuencia de la luz bombardeante, no de su intensidad. Cuanto mayor es la frecuencia, más electrones se liberan. Esto se podía explicar si se considera que la luz está compuesta de cuantos (y la luz de frecuencia mayor de cuantos mayores).

Una vez más, parecía que la luz viajaba tanto en forma de ondas como de partículas.

Sin embargo, el mundo científico en general se negaba a aceptar tales tonterías.

Esta teoría cuántica era solo un ingenioso «invento alemán» que tapaba un hueco debido a que nuestro conocimiento se había adelantado temporalmente a cualquier teoría más general capaz de ofrecer una explicación. La teoría cuántica era claramente ilógica, y no podía durar. Pasados unos años llegaría una teoría más completa que explicaría como es debido las anomalías explicadas de modo tan complejo por la teoría cuántica. Esta teoría más completa concordaría sin duda con la física clásica. Incluso los propios Planck y Einstein estaban convencidos de que sería así.

La explicación de Einstein acerca de la luz ultravioleta en contacto con ciertos metales se encontraba dentro del mismo terreno científico que la tesis de Bohr sobre la teoría del electrón en los metales. Bohr había llegado también a la conclusión de que las partículas subatómicas no obedecen a las leyes de la física clásica, pero ni él, ni nadie, veía la relación entre todo esto y el problema de la estructura atómica, que era el problema al que se enfrentaba ahora Bohr en su defensa del modelo «solar» de Rutherford.

La clave para la estructura de los diferentes elementos fue descubierta gracias a un nuevo tipo de espectroscopio inventado en 1814, obra del óptico bávaro Joseph von Fraunhofer, quien sobrevivió a su enterramiento en vida cuando el edificio de pisos en el que trabajaba se le derrumbó encima. Todas las otras personas que estaban en el edificio murieron, y el elector Maximiliano José conmemoró su milagrosa salvación recompensándole con la principesca suma de dieciocho ducados. Esto permitió a Fraunhofer dedicarse a investigar por su cuenta, lo cual le llevó a inventar el espectroscopio. Si cualquier elemento en estado gaseoso es sometido a un calor intenso, resplandece, y cuando la luz así emitida se examina al espectroscopio se ven por separado los colores que la componen. Estos aparecen como bandas de líneas coloreadas en el espectro general de los colores, y se vio que cada elemento tenía su propio «espectro de emisión» característico.

A cada línea del espectro de emisión se le puede asignar un valor numérico preciso según su longitud de onda. Las líneas parecían repetirse como una secuencia

armónica. Pero la fórmula para dicha secuencia eludió a todos hasta 1885, cuando el suizo Johann Balmer, maestro de escuela secundaria femenina en Basilea, descubrió una. Era como sigue: «Cuadrar el número 3. Dividir uno entre el resultado y restar esta fracción a 1/4. Multiplicar el resultado por el número 32 903 640 000 000 000». Esto da la frecuencia (y por tanto la longitud de onda) de la línea roja en el espectro del hidrógeno.

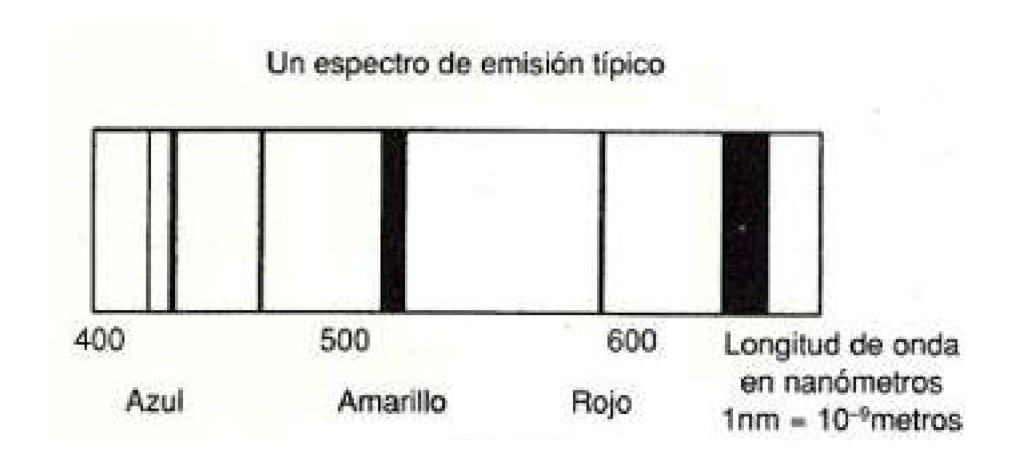


Figura 5

Justo la clase de cosa que se podía esperar de un maestro de escuela de provincias (y quizá por eso mismo no dieron con ella mentes más brillantes).

Pero la fórmula no era tan torpe como parece. Si en lugar de 3 se empieza con el número 4, se obtiene la línea verde del espectro, y con el 5 se obtiene la frecuencia de la línea violeta. Cuando se descubrieron más líneas en el espectro de emisión del hidrógeno, se encontró que los números siguientes (6, 7, 8 y otros) daban cifras que, curiosamente, correspondían a su frecuencia. La fórmula de Balmer funcionaba, pero nadie sabía por qué. Más intrigante aún, nadie tenía ni idea de lo que significaban las líneas espectrales. Simplemente se aceptaba que cada elemento tenía su «firma».

Asombrosamente, Niels Bohr era casi por completo ignorante de todo lo relacionado con la espectroscopia cuando empezó a trabajar sobre el modelo «sistema solar» del átomo de Rutherford. Según la leyenda, un día Bohr estaba hojeando un libro de texto escolar de física y se topó casualmente con la fórmula de Balmer. Intrigado por su intratable singularidad, empezó a hacer cuentas mentales. Entonces llegó el

momento «eureka». Se dio cuenta de que la fórmula de Balmer se podía escribir de otra manera, usando la constante *h* que Planck había empleado en su fórmula destinada a establecer el tamaño de los cuantos, en su teoría de la luz. *¡Esto significaba que el espectro de un elemento tenía relación con la teoría cuántica!* ¿Pero de qué manera exactamente? Bohr se concentró en el elemento más simple de todos, el hidrógeno. Según la representación del átomo de Rutherford, el hidrógeno tiene un solo electrón que orbita alrededor del núcleo central. De acuerdo con las leyes de la física clásica debería irradiar una sola banda de color. En su lugar irradiaba varias bandas separadas, conectadas según un patrón fijo y regular (conforme al 3, 4, 5 etc. de la fórmula de Balmer).

En teoría, el electrón único del átomo de hidrógeno podía girar alrededor del núcleo describiendo todo tipo de órbitas diferentes. Cuanto mayor el radio, a mayor velocidad orbitaría el electrón, y por tanto mayor sería su energía. De modo que si el electrón pasaba a una órbita menor, tendría que emitir energía, cosa que haría en forma de luz. La energía emitida por el átomo era lo que conformaba su espectro. Bohr vio enseguida lo que esto quería decir. Las precisas bandas energéticas que conforman el espectro estaban relacionadas de algún modo con las diferentes órbitas del electrón. Bohr se percató de que para emitir la cantidad fija de energía requerida, el electrón tenía que moverse entre ciertas órbitas fijas. Mientras el electrón tuviera una órbita fija, el átomo se hallaría en lo que Bohr llamó su «estado estacionario». Solo cuando se moviera entre estas órbitas fijas emitiría la cantidad fija de energía necesaria para producir un determinado tipo de banda en el espectro. Por ello entendió que las órbitas fijas de estos estados estacionarios estaban relacionadas con la fórmula de Balmer, pues esta daba las cifras para las bandas en el espectro de emisión.

Como hemos visto, en un momento de inspiración Bohr se dio cuenta de que se podía reescribir la fórmula de Balmer con la constante de Planck, relativa al comportamiento de los cuantos. *¡Esto suponía que las diferentes órbitas del electrón en el átomo de hidrógeno estaban fijadas de acuerdo con la teoría cuántica!* La estructura del átomo estaba determinada por la teoría cuántica.

Recapitulando: En cada estado estacionario el electrón tiene un radio fijo diferente. Bohr ya se había dado cuenta de que estos estados debían estar relacionados con la

fórmula de Balmer para las bandas espectrales. ¡Así que cada radio fijo de electrón estaba relacionado con las diferentes aplicaciones de la fórmula de Balmer! En otras palabras, Bohr se había dado cuenta de que tanto la fórmula de Balmer para las bandas espectrales *como* la teoría cuántica tenían conexión con la estructura del átomo.

La fórmula de Balmer para colocar bandas espectrales empieza diciendo «cuadrar el número 3…» (o 4 para el verde, 5 para el violeta, o 1 o 2 y así sucesivamente). Esto suponía que los radios fijos del electrón guardan exactamente la misma relación, de modo que ahora era relativamente fácil para Bohr calcular los radios de estas órbitas. El diagrama siguiente muestra el modelo de Bohr de las primeras cuatro órbitas del electrón en los estados estacionarios del átomo de hidrógeno.

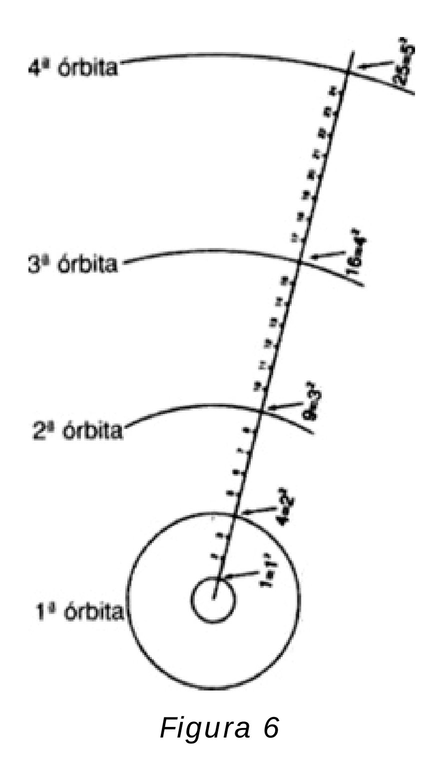


Figura 6

El radio de cada órbita está relacionado con el número requerido para la fórmula de Balmer. La diferencia entre los radios da la diferencia entre los estados energéticos, que a su vez cuadran con las bandas energéticas del espectro.

La diferencia entre estas órbitas puede haber dado las cifras correctas para el espectro del hidrógeno, ¿pero cómo se liberaba la energía? Muy sencillo, según Bohr. El electrón «salta» de una órbita a otra, simplemente.

Imaginen un tren desplazándose por una vía fija (el electrón en su órbita fija).

En contra de todas las leyes de la física el tren salta repentinamente a una vía interior que tiene a su lado. Al hacerlo despide un destello de luz (se libera una banda de color para el espectro del hidrógeno).

Según las leyes de la física clásica esto era sencillamente imposible. Como se ha dicho ya, lo lógico es que el electrón fuera irradiando energía de forma continua a medida que orbita, y esta energía sería emitida en una sola banda del espectro. Asimismo, irradiando energía de este modo el electrón tardaría menos de un nanosegundo (10^{-9} segundos) en estrellarse contra el núcleo. Obviamente, la física clásica no podía explicar lo que ocurría. El modelo de Bohr sí podía, aunque contradijera todas las reglas. Según el modelo de Bohr, en el estado estacionario el electrón *no* emite energía alguna. El electrón solo emite energía cuando salta de una órbita más externa a otra interna. (Cuando salta de una órbita interna a otra más alejada, la energía es *absorbida*). Así que no solo la estructura del átomo, sino también el comportamiento de sus partículas subatómicas parecía concordar con la teoría cuántica.

El esquema de Bohr era una mezcla curiosa. Obedecía muchas de las leyes de la física clásica (ciertos elementos de la dinámica de los cuerpos en órbita, por ejemplo), a la vez que contradecía otras (como las leyes de la causalidad). En cualquier caso, tenía un rasgo sensacional. *Concordaba de forma precisa con la teoría cuántica de la luz de Planck*. La luz emitida por un electrón que salta de una órbita a otra no sería continua. Sería emitida en ráfagas, igual que los «cuantos» de Planck.

El diagrama inferior muestra el esquema de Bohr para el átomo de hidrógeno, con los diferentes radios del electrón. Las flechas indican los varios saltos de una a otra órbita que dan lugar a las diferentes frecuencias en el espectro del hidrógeno.

La teoría cuántica podía explicar cómo era emitido el espectro del átomo de hidrógeno. Junto con la explicación de Einstein del efecto fotoeléctrico, parecía confirmar la noción original de Planck de la teoría cuántica. Más aún, extendía de modo considerable la aplicación de la idea de Planck. Bohr mostró que la teoría cuántica era esencial para la comprensión de los fenómenos subatómicos, y de paso produjo el primer esquema completo de una estructura atómica estable. Aquí

estaba la nueva física que explicaba el comportamiento anómalo de las partículas subatómicas.

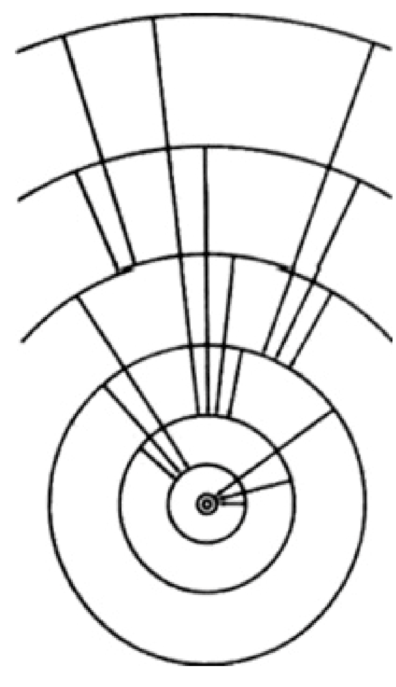


Figura 7

Bohr inició su trabajo sobre la estructura atómica en 1912, después de su traslado de la Universidad de Cambridge a la de Manchester para trabajar con Rutherford. (Por uno de esos caprichos del destino, otro gran pensador del siglo XX cogió el tren en dirección opuesta. En 1912 el filósofo Wittgenstein dejaba la Universidad de Manchester para trasladarse a Cambridge). Rutherford estableció pronto una buena relación de trabajo con su nuevo y joven investigador, aunque no le convencía mucho lo que Bohr había decidido investigar: quería encontrar un respaldo sólido para el inestable esquema «solar» de Rutherford para el átomo. Rutherford consideraba su esquema como «provisional». Era demasiado teórico y no había sido puesto a prueba lo suficiente como para merecer confianza; a su modo de ver no se podía construir nada sobre una noción semejante. Pero edificar sobre la teoría era la especialidad de Bohr, y parecía tener un olfato infalible para las teorías duraderas. Pese a sus reservas, Rutherford no tardó en animar a Bohr con el mismo franco entusiasmo (combinado con duros interrogatorios) al que sometía a todos los miembros de su equipo. Por las mañanas Rutherford tenía la costumbre de marchar

por los laboratorios cantando «Onward Christian Soldiers» (Adelante soldados de Cristo). Era una época emocionante para la ciencia, y para los implicados se parecía mucho a una cruzada. La brecha entre el nuevo y joven mundo y el monolito de antiguas certezas se abría en toda la cultura europea.

Eran los tiempos en que Europa dominaba el mundo, los últimos días de grandeza del imperio austro-húngaro, pero también los tiempos del cubismo, la relatividad y el cine mudo.

Al final del curso estival Bohr dejó Manchester y volvió a Dinamarca. Dos años antes su querido hermano Harald había marchado a ocupar un puesto en la Universidad de Göttingen, cuya reputación en matemáticas no era superada por ninguna otra universidad. Fue en este periodo de desacostumbrada soledad que Niels conoció a una estudiante de pelo rubio y esponjado llamada Margarethe Norlund. Niels y Margarethe quedaron prendados el uno del otro desde el primer momento. Ella le ayudó a preparar la versión final de su tesis de doctorado, y se comprometieron antes de que Niels regresara a Inglaterra. Parece que tuvieron éxito en crear una relación perfectamente convencional, tan sosa (para los demás) como profunda. El concepto de «amor verdadero» se extinguió hace tiempo en las sociedades avanzadas, convertido en algo nauseabundo por obra de la sentimentalidad empalagosa, reventado por la psiquiatría y saboteado por el divorcio. Pero en los primeros años del siglo XX el amor verdadero estaba vivito y coleando, y se esperaba de él que durara toda la vida.

Cuando Niels volvió a Copenhague en el verano de 1912, se casó con Margarethe.

Las fotos de la pareja muestran a un Niels sorprendentemente juvenil, con sus rasgos gruesos y sensuales aligerados por una sonrisa. Apoyada en él, vemos a su joven mujer con un aire de felicidad inconfundible, con el brazo entrelazado con el suyo. Parecen perfectamente felices el uno con el otro, un entendimiento que habría de durar cincuenta años.

Después de su matrimonio Bohr fue nombrado profesor asistente en la Universidad de Copenhague, pero mantuvo lazos estrechos con Manchester. Mantenía correspondencia regular con Rutherford y sus colegas sobre sus progresos. El escrito final de Bohr sobre la estructura atómica fue revisado varias veces.

Algunas revisiones fueron hechas en respuesta a cuestiones técnicas suscitadas por sus corresponsales en Manchester, pero muchas se debían al método de redacción de Bohr. Era un escritor penosamente lento, siempre en busca de un significado más preciso. Le gustaba sumergirse en las palabras, en lugar de limitarse a usarlas. Era como si su proceso creativo tuviera lugar en el lenguaje en lugar de utilizarlo como medio de expresión. (Pese al estructuralismo, hay una distinción aquí, como la hay entre sintaxis y metáfora). El caso es que esto resultaba en una lectura difícil, y cuando la técnica de Bohr se extendió a las aulas, demostró ser un serio inconveniente, tanto para el hablante como para el receptor. Por suerte este defecto quedaba compensado por su evidente entusiasmo y la pura brillantez de sus ideas. Comprender una clase de Bohr tenía algo de hazaña intelectual que ponía a prueba todos los recursos de los atletas intelectuales. Solo los dotados de una concentración maratoniana y una velocidad de comprensión de esprínter podían aguantar el ritmo.

En marzo de 1913 Rutherford recibió la versión final del artículo de Bohr. Después de leerlo, Rutherford le escribió: «Supongo que no tienes inconveniente en que conforme a mi criterio suprima cualquier cosa que considere innecesaria en tu escrito». Bohr cogió el primer barco para Inglaterra y se plantó en la oficina de Rutherford a la mañana siguiente antes de que este pudiera terminar el primer verso de «Onward Christian Soldiers». Durante todo el día y varias horas de la noche Bohr defendió su escrito línea por línea. Finalmente, el maduro Rutherford cedió a la persistente insistencia del serio joven danés. El artículo se publicó sin cortes en el *Philosophical Magazine*, y causó sensación. De la noche a la mañana Bohr se convirtió en el *enfant terrible* del átomo.

Bohr había sugerido que la teoría cuántica era la manera de funcionar de los átomos. Sus ideas fueron despachadas como tonterías. ¿Cómo podía la base fundamental de la materia descansar sobre algo tan inestable? Para muchos, la teoría cuántica seguía sin ser más que ese «invento alemán» demasiado ingenioso que no podía durar. Sorprendentemente, fue ridiculizada incluso en Göttingen.

Harald Bohr defendió bravamente a su hermano: «Si Niels dice que algo es verdad, debe ser verdad». Uno de los principales físicos teóricos de Alemania, Max von Laue, estaba tan indignado con las ideas de Bohr que anunció: «Si esta teoría es

correcta, abandonaré la física». (Por suerte se le pudo disuadir de tan drástica acción, y más tarde incluso llegó a ser íntimo amigo de Bohr). Esta, y otras reacciones apopléticas por el estilo, no son del todo achacables a la obstinación o el prejuicio. Muchos sentían que la ciencia no podía seguir por este camino sin destruirse a sí misma. La explicación de Bohr era simplemente *acientífica*. No solo desafiaba las leyes de la física clásica, sino a la propia lógica. Describir la estructura del átomo con una combinación de física clásica y teoría cuántica era absurdo. Los principios de la física clásica y los de la teoría cuántica eran *contradictorios*.

Peor aún para Bohr, no tardó en ponerse de manifiesto que su modelo del átomo de hidrógeno no era lo bastante complejo para dar cuenta de algunos detalles sutiles del espectro del hidrógeno. El problema sería resuelto con el tiempo por el profesor de física de Munich Arnold Sommerfeld, el primer creyente de relevancia en la teoría cuántica tras Einstein. Sommerfeld aplicó la teoría de la relatividad de Einstein al movimiento de los electrones alrededor del núcleo central, y se dio cuenta de que estas órbitas tenían que ser elípticas (más parecidas aún al *auténtico* sistema solar). Esto acabó conduciendo al siguiente esquema del núcleo y las diferentes órbitas fijas del electrón.

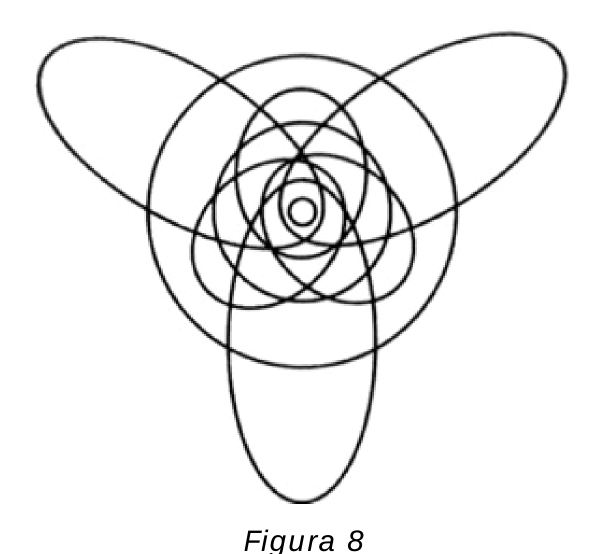


Figura 8

El modelo de Sommerfeld podía dar cuenta de las líneas más finas del espectro del hidrógeno, pero quedaban algunos problemas serios. La contradicción fundamental entre la teoría cuántica y la física clásica se estaba mostrando intratable. Además, el

esquema de Bohr podía cuadrar con el átomo del hidrógeno, que tenía un solo electrón, pero no tardaron en surgir las dificultades cuando se intentó aplicar a estructuras atómicas más complejas. ¿Era este átomo cuántico del hidrógeno una anomalía, una excepción? Bohr tuvo que forcejear con el trabajo teórico terriblemente complejo que suponía tratar de extender su modelo de una sola estructura atómica particular al plan general de *todas* las estructuras atómicas.

Este trabajo le exigía mucho tiempo y energía. Cuando Rutherford le ofreció un nuevo puesto no docente en Manchester en 1914, Bohr aceptó gustoso. Antes de que pudiera ocupar el puesto estalló la primera guerra mundial. Dinamarca permaneció neutral, pero hubo combates navales entre navíos británicos y alemanes frente a las costas danesas. Gran Bretaña logró controlar el Mar del Norte y garantizar un paso seguro a los barcos neutrales. Aun así, el ferry que llevó a Bohr y a su esposa a Gran Bretaña hubo de seguir una ruta larga y desviarse alrededor de las costas escocesas, entre la niebla y las tormentas.

Bohr siempre había creído en el internacionalismo de la ciencia: se trataba de conocimiento en beneficio de la humanidad, no de las diferentes naciones. Este punto de vista hallaba eco en varios miembros de la generación ascendente de científicos alemanes. Pese a las barreras impuestas por la guerra, Bohr, en Manchester, no tardó en recibir noticias de Alemania. Así pudo saber que algunas predicciones teóricas hechas a partir de su estructura atómica cuántica estaban ya desembocando en avances espectaculares para la nueva ciencia de la física subatómica. Aunque las preguntas sin respuesta suscitadas por la estructura de Bohr seguían allí, se iba haciendo evidente que explicaba demasiadas cosas como para abandonarla. A Bohr le emocionaba este desarrollo de los acontecimientos.

Tanto era así que dio el paso poco habitual de intentar confirmar una de las predicciones alemanas por medio de un experimento práctico.

Los complejos aparatos que exigía el experimento requerían intrincadas y menudas piezas de cristal, y Rutherford se aseguró de que Bohr contara con los servicios del mejor hombre disponible. Este resultó ser un alemán llamado Otto Baumbach.

Solo el inmenso prestigio de Rutherford pudo garantizar que un extranjero de una nación enemiga tuviera las manos libres para dirigir un laboratorio en plena guerra. Por desgracia el experto soplador de vidrio Otto no tardó en sentirse incómodo

trabajando solo en territorio enemigo. En momentos de estrés tenía la manía de pronunciar airados discursos de propaganda antibritánica, informando a los asombrados científicos de lo que les pasaría exactamente cuando los alemanes ganaran la guerra y se hicieran cargo del laboratorio. A diferencia de los demás, a Bohr no le preocupaba: «Todos los buenos sopladores de vidrio son temperamentales», dijo. «Lo único que hace es desahogarse con estas tonterías ultrapatrióticas».

El final de la situación superó a todos, y tras una serie de incidentes inflamatorios Otto fue detenido e internado. Por desgracia, a esto siguió otro incidente aún más inflamatorio, un incendio en los aparatos que redujo las insustituibles piezas de cristal de Otto a un montón de añicos. Una vez más, los esfuerzos de Bohr en el laboratorio estaban condenados.

A medida que iba siendo reconocida la enorme importancia de los trabajos de Bohr, las autoridades danesas empezaron a comprender su pérdida. En un gesto sin precedentes, la Universidad de Copenhague ofreció una cátedra a Bohr a sus treinta años, con la promesa de que si volvía pondrían fondos a su disposición para que organizara un instituto especial desde el que podría continuar sus investigaciones.

En 1916, mientras las flotas británica y alemana preparaban su encuentro cerca de la costa de Jutlandia, los Bohr hicieron el peligroso viaje de vuelta por el Mar del Norte. Margarethe estaba embarazada, y unos meses más tarde nació su primer hijo en Copenhague. El ateo Bohr llamó a su hijo Christian en honor a su padre, también ateo. «Será para siempre un recuerdo de vuestra estancia en Manchester», le escribió Rutherford tras recibir la noticia. De hecho, el recuerdo de Manchester sería aún más profundo para Bohr. Rutherford había llenado el vacío dejado en su vida por la muerte de su padre. El serio, algo ingenuo y joven Bohr vino a considerar al robusto y bondadoso gran hombre como una figura paterna y un modelo. Bohr nunca olvidaría el laboratorio de Rutherford en Manchester. Así es como se debía practicar la ciencia: en un ambiente de camaradería y discusión fructífera en el que todos participaran. Si el joven Bohr hablaba, el gran Rutherford escuchaba. Cuando Bohr montara su propio instituto como se le había prometido, no lo olvidaría, y el efecto sobre la ciencia sería incalculable. No es exagerado decir

que al favorecer este tipo de ambiente en su propio laboratorio Bohr revolucionaría la ciencia del siglo XX.

Pero no todos los que le conocieron apreciaban su informalidad. Al convertirse en catedrático de física de la Universidad de Copenhague, se esperaba que Bohr compareciera vestido de chaqué y guantes blancos a una audiencia con el rey.

Bohr apareció el día señalado y fue formalmente presentado al rey Christian X, militar algo cascarrabias y gran maniático de la etiqueta cortesana. El rey dio un cordial apretón de manos a Bohr y dijo lo complacido que estaba de conocer a tan gran futbolista. Bohr se sintió obligado a señalar que él no era el Bohr futbolista famoso, sino su hermano. El rey se quedó atónito. Una de las reglas básicas de la etiqueta cortesana estipula que *nunca* hay que contradecir al rey, diga lo que diga. Christian X decidió pasar por alto este grave atentado contra el decoro y dio a Bohr otra oportunidad. Empezó otra vez desde el principio, diciendo lo complacido que estaba de conocer a tan gran futbolista. Bohr optó por una táctica diferente. Estaba acostumbrado a explicar cosas a los grandes: siempre conseguía que Rutherford le entendiera al final. Sí, era futbolista, lo reconocía, pero era su hermano el futbolista famoso. Indignado, el rey declaró: «*Audiensen er forbi!*» (la audiencia ha terminado), y a Bohr se le indicó que podía marcharse, de la manera habitual, alejándose hacia la puerta sin volver la espalda al rey.

Pese a la metedura de pata, las autoridades danesas mantuvieron su promesa. En 1918 empezaron las obras del nuevo *Institut for Teoretisk Fysik*, y Bohr fue nombrado futuro director del mismo. Pese al nombre, el instituto habría de albergar también una serie de laboratorios costosamente equipados para realizar trabajos prácticos. Los fondos iniciales fueron aportados por Carlsberg, fabricantes de, probablemente, la mejor cerveza de Dinamarca. (En Dinamarca la caridad empieza por la fábrica de cerveza: Carlsberg apoya a la ciencia, Tuborg a las artes). Pero como todos sabemos, la cerveza por sí sola no es apoyo suficiente. El propio Bohr se vio obligado a ir a la caza de fondos para su nuevo instituto, antes de que pudiera abrir por fin en 1921.

El instituto empezó rápidamente a atraer a científicos jóvenes y ambiciosos de toda Europa, todos ellos ansiosos por aprender de Bohr y trabajar con él. Como resultado, no tardaron en hacer alentadores avances en Copenhague. Sobre la base

del modelo atómico de Bohr, se había podido predecir la existencia de un elemento hasta entonces desconocido, el elemento nº 72. Por medio del análisis espectral, el elemento nº 72 fue identificado por primera vez en el Instituto de Copenhague. El descubrimiento de este nuevo elemento ayudó mucho a respaldar la obra de Bohr y se le llamó hafnio (por la forma latina de København —Copenhague—).

Pero el descubrimiento no tardó en topar con problemas. Fue disputado nada más salir a la luz. El célebre experimentador irlandés septuagenario Arthur Scott protestó públicamente, anunciando que había descubierto este elemento nueve años antes, en 1913, y que lo había llamado celtio en honor de su patria. La prensa popular se sumó enseguida a la disputa, convirtiendo el asunto en una cuestión de orgullo nacional en ambos países. Apenas acababan Bohr y su instituto de ganarse una reputación internacional, parecía que por ser acusados de tramposos iba a quedar arruinada. Scott apareció en público blandiendo un tubo de ensayo con una muestra de celtio. Las cosas llegaron a tal punto, que Rutherford fue llamado para zanjar la cuestión. Rutherford acabó convenciendo a Scott de que mandara una muestra de celtio a Copenhague para su análisis espectral. No contenía ni rastro del elemento N° 72. Algunos elementos tienen una media vida, otros una existencia más breve aún. El celtio se desvaneció entre las brumas de la leyenda química, y no se ha vuelto a saber de él (ni siquiera en Irlanda).

En 1922 Bohr recibió la mayor de las distinciones, el premio Nobel de física.

Fueron años memorables para los premios Nobel de física. En los siete años siguientes a 1918 fue ganado por Planck, Einstein, Bohr, Millikan y Hertz, pero no todo fueron gigantes. En 1919 lo ganó Johannes Stark, quien más tarde trató de extirpar de la Alemania nazi la «ciencia judía», es decir, la relatividad, la teoría cuántica, la física nuclear y otras tales basuras racialmente inferiores.

Pese al reconocimiento público, la teoría cuántica estaba todavía en mantillas.

Era una situación única para realizar grandes progresos, pero aún no podía construir un fundamento sólido para sí misma. Eran tiempos emocionantes. A veces alguno de los jóvenes y brillantes colegas de Bohr le preguntaba hacia dónde creía que se dirigía la ciencia. Bohr cogió la costumbre de citar el Fausto de Goethe: « ¿Cuál es el camino? No hay camino. Adelante hacia lo desconocido».

Tomemos por ejemplo, la frecuencia de las líneas emitidas en el espectro de un átomo. Según el esquema cuántico, estas aparecen cuando el electrón «salta» de una órbita a otra, y no se emite radiación alguna cuando el electrón gira alrededor del núcleo en su «estado estacionario». Sin embargo, la mecánica clásica decía exactamente lo contrario. La radiación era producida por el electrón mientras orbitaba alrededor del núcleo, y podía ser calculada en consecuencia. Es obvio que ambos esquemas no podían ser ciertos. Pero Bohr encontró que cada esquema de «salto» cuántico podía ser «coordinado» con una órbita mecánica clásica correspondiente. El átomo podía ser clásico o cuántico.

Ciertamente, para las frecuencias más bajas, la teoría cuántica y la mecánica clásica daban *exactamente las mismas respuestas*. Esto llevó a Bohr a formular su famoso principio de correspondencia, que postulaba que a frecuencias lo bastante bajas, las leyes de la teoría cuántica y las de la mecánica clásica se convierten en idénticas.

Esto era absurdo, claro. Ilógico, imposible, impensable, etc. Pero era lo que ocurría, y además, ¡era lo que funcionaba! No es extraño que un científico de la estatura de Von Laue amenazara con dar la espalda a la física si la teoría cuántica resultaba ser cierta. Incluso Einstein chocó con Bohr. Fue la física cuántica la que dio pie a Einstein para hacer su famoso comentario: «Dios no juega a los dados con el Universo». La verdad es que Bohr y sus colegas del Instituto en Copenhague estaban igual de desconcertados. Pero seguían siendo optimistas; estaban decididos a seguir avanzando por este camino cada vez más tortuoso («no hay camino»). El propio Bohr era consciente de que su principio de correspondencia era solo un remiendo de retales.

Pero estos «retales» estaban dando lugar a avances sin precedentes en el conocimiento científico. Ya en los primeros años de la década de los veinte la teoría cuántica atraía a las mejores mentes del mundo científico. Cada cual echaba mano de lo que podía. Físicos que no habían nacido cuando Planck propuso la teoría cuántica por primera vez estaban produciendo teorías brillantes. Era una verdadera ciencia del siglo XX, y su centro principal estaba en el recién creado instituto de Bohr. (De hecho, durante un tiempo los únicos otros participantes en la carrera fueron Göttingen y Cambridge, a donde ahora se había trasladado Rutherford). La lista de los que trabajaron en el instituto de Bohr parece una lista internacional de la

próxima generación de gigantes del siglo XX. El suizo Pauli, Heisenberg de Alemania, Dirac de Inglaterra, Landau de Rusia y otros genios menos conocidos —todos ellos trabajaron en algún momento en el instituto de Bohr. Y ahora la teoría cuántica se desarrolló hasta convertirse en la mecánica cuántica, a medida que la mecánica interna del esquema cuántico del átomo iba siendo desentrañada. ¿Cómo *funcionaba* en realidad el átomo de Bohr? La teoría cuántica estaba acumulando contenidos a una velocidad de vértigo. En la mejor tradición Bohr, se construía teoría sobre teoría sin cesar.

Gradualmente se iba formando un cuadro inmensamente complejo de este mundo subatómico en el que no rigen ni la lógica ni la causalidad. Pero hubo ciertos avances que cambiaron el cuadro entero. Uno de ellos se debió al rechoncho prodigio suizo de veintitrés años Wolfgang Pauli, quien tendía a caer en estados de profunda melancolía cuando descubría un problema que no podía entender. Uno de tales problemas era un efecto anómalo de los espectros de emisión atómicos que no podía ser explicado por el modelo de estructura atómica de Bohr. Este modelo (a veces conocido como el modelo Bohr-Sommerfeld) se había desarrollado considerablemente.

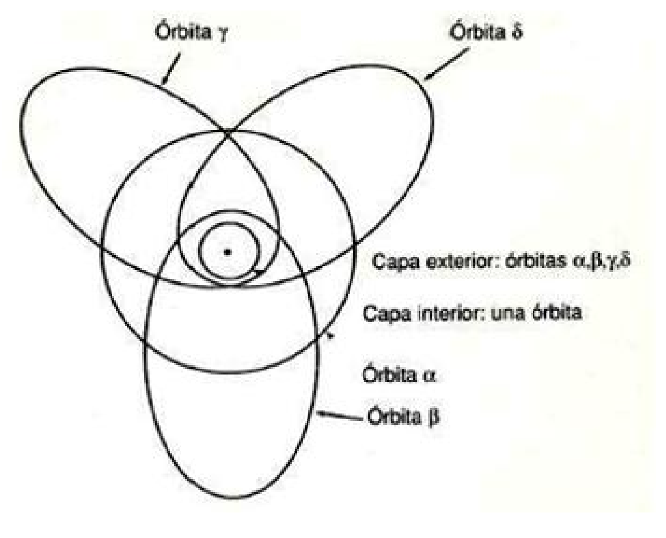


Figura 9

Ya podía mostrar la disposición general de los electrones alrededor del núcleo de átomos más complejos (es decir, aquellos con un número superior al electrón único del átomo de hidrógeno). Los electrones estaban dispuestos en diferentes órbitas

fijas alrededor del núcleo. Se averiguó que estas órbitas fijas estaban en grupos diferentes, cada uno de los cuales se llamó «concha» (o capa). Por ejemplo, se encontró que en todos los átomos la capa interior consiste en una sola órbita (representada en el diagrama siguiente por la órbita circular más interna). La capa siguiente contiene cuatro órbitas (como se representa en el diagrama con una órbita circular y tres elípticas).

Según el esquema de Bohr, las órbitas interiores deberían estar cada vez más saturadas de electrones (pues para emitir energía, el electrón debe saltar a una órbita interior). Pero por alguna razón esto no sucedía. Pauli resolvería el problema en 1924.

A estas alturas Pauli estaba muy disgustado con su incapacidad para explicar la anomalía de los espectros atómicos que no encajaba en el modelo de Bohr, tanto que le había dado por deambular sin rumbo por las calles de Copenhague durante horas en un estado de profunda depresión. Pero la ayuda estaba a punto de llegar. Recientemente se había propuesto que los electrones quizá giraban sobre sí mismos mientras orbitaban alrededor del núcleo (de nuevo, como hacen los planetas alrededor del Sol). Aprovechando esta idea, Pauli no solo explicó la anomalía de los espectros atómicos, sino también por qué los electrones no se amontonan en las órbitas interiores.

Dicho de manera simple, Pauli mostró que cada órbita fija no podía contener más de dos electrones. Cuando esta estaba completa, el siguiente electrón quedaba *excluido* y debía ocupar otra de las órbitas de la capa. Si no quedaban órbitas con espacio libre en dicha capa, el nuevo electrón quedaba excluido y debía ocupar una órbita vacía en la siguiente capa exterior. Pauli lo llamó el principio de exclusión. No solo mostraba cómo evitaban los electrones amontonarse en las órbitas interiores; también explicaba la estructura de los elementos de la Tabla Periódica.

Por poner un ejemplo, el átomo de hidrógeno tiene un solo electrón en la capa interior. El elemento siguiente, el helio, tiene dos, completando así la capa.

Esto significa que es de algún modo más «completo»: es menos propenso a tomar un nuevo electrón o perderlo, siendo por tanto improbable que reaccione con otro

elemento. Esto explicaba por qué el helio había sido siempre uno de los llamados elementos inertes.

El tercer elemento, el litio, tiene dos electrones en la capa interior y uno en la siguiente. Como hemos visto en el diagrama precedente, la capa siguiente tiene cuatro órbitas, y por tanto sitio para hasta ocho electrones. Cuando se completa, tenemos un átomo con diez electrones en total (dos en la capa interior y ocho en la exterior). Este décimo elemento es el neón. Al igual que el helio antes mencionado, sus capas están completas, y ambos elementos tienen propiedades similares y pertenecen a los elementos inertes. La semejanza periódicamente repetida entre los elementos de la Tabla Periódica original de Mendeleyev quedaba ahora mejor explicada. Las propiedades de cada elemento están dictadas no solo por el número de electrones que contiene, sino también por su disposición en las capas orbitales y por la medida en que la capa exterior esté llena de ellos.

Aunque Bohr no colaboró con Pauli en la creación del principio de exclusión, sí jugó un papel en su concepción, como hizo en tantos avances de esta era dorada que vio nacer la mecánica cuántica (aproximadamente de 1924 a 1928). Durante todo el tiempo en que Pauli trataba de formular su principio, mantuvo una constante «discusión» con Bohr al respecto por medio de cartas y entrevistas durante sus estancias en Copenhague. De este modo Bohr se convirtió en una especie de figura paterna en lo referente a los avances de la mecánica cuántica. No siempre estaba de acuerdo con sus colegas más jóvenes, pero el ambiente de discusión fructífera entre iguales que creó en el Instituto desempeñó un papel fundamental en estos revolucionarios descubrimientos.

Otro avance sensacional tuvo lugar en 1925, de la mano del joven prodigio alemán de veintitrés años Werner Heisenberg, quien además de ser un físico brillante encontraba tiempo para ser un montañero de primera, un excelente pianista, podía memorizar pasajes inhumanamente largos de Goethe, y rara vez dormía más que unas pocas horas. Pese a dichos obstáculos, también se las arregló para seguir siendo humano, y no tardó en alcanzar un estrecho entendimiento con Bohr. Fue Heisenberg el que encontró la manera de superar lo ilógico del principio de correspondencia de Bohr. Tanto el esquema cuántico de la estructura atómica (el modelo Bohr-Sommerfeld) como el esquema mecánico clásico (el modelo de tipo

«sistema solar» de Rutherford) estaban de acuerdo en que el átomo emite energía (luz), que produce el espectro de emisión del átomo.

Pero según la teoría cuántica esta luz viaja en forma de cuantos (paquetes de energía, u ondas-partículas), es decir, de manera discontinua. La teoría cuántica explica incluso por qué la luz viaja así: porque cada vez que los electrones «saltan» de una órbita fija a otra liberan «cuantos» de energía. Sin embargo, según la mecánica clásica la luz se transmite en ondas continuas, de forma constante. Según el principio de correspondencia de Bohr, la mecánica clásica y la teoría cuántica convergen en las frecuencias bajas, hasta el punto de ofrecer las mismas respuestas y ser *idénticas*. Pero esto no podía ser así. Una cosa es continua o es intermitente, ¡no puede ser ambas cosas a la vez! (Si mi vaso está continuamente vacío, eso significa que nunca hay cerveza en él. Si está intermitentemente vacío quiere decir que alguien lo llena y yo lo vacío). Heisenberg encontró una manera brillante de esquivar esta contradicción lógica.

Problemas tales como la radiación energética continua/intermitente se pueden superar *simplemente concentrándose en la observación, y solo en la observación*.

Solo las propiedades medibles del átomo deben considerarse «reales». El concepto del átomo como diminuto sistema solar —concuerde con el modelo Bohr-Sommerfeld o con el modelo clásico— fue abandonado sin más. Como dijo Heisenberg: « ¿Por qué hablar de un electrón invisible orbitando dentro de un átomo invisible? Si no se pueden ver, no son significativos». No importa visualizar algo como una onda continua o una partícula discontinua. Esto es irrelevante si lo que nos concierne es la *medición*. Todas las mediciones dependen de cómo se tomen, pero los resultados no pueden dejar de concordar unos con otros. Son solo resultados.

Era una intuición brillante, ¿pero cómo iban a expresarse dichas *mediciones* de manera significativa sin un esquema mental sobre el que encajarlas? (es decir, un modelo, como el del átomo «sistema solar»). La manera de superar el problema fue disponer las diferentes mediciones en líneas y columnas, en forma de matriz.

Así, aplicando la teoría de matrices sería posible predecir valores futuros para variables físicas (como las de las partículas) y probabilidades matemáticas para estados energéticos cambiantes (como los de las ondas). Estas columnas

rectangulares de cifras resultaron mucho más útiles que cualquier esquema visual del átomo. Facilitaron la primera forma consistente de mecánica cuántica que permitió hacer predicciones, de un modo semejante al de la mecánica clásica.

¿Qué iba a pasar ahora? ¿Había que tirar por la ventana todo el ingenioso esquema «solar» del átomo sin más? ¿Cómo podía ser erróneo el principio de exclusión de Pauli si servía para explicar tantas cosas del comportamiento de los elementos? La respuesta, claro, es que no lo era. Superando una ambigüedad, la mecánica cuántica había topado con otra.

Dos años después Heisenberg postuló su famoso principio de indeterminación, el último clavo en el ataúd de la física clásica. Elaborando sobre la noción de que solo podía obtenerse certeza de la medición, Heisenberg reconoció que en lo que a la mecánica cuántica se refiere, ni eso puede ofrecer una certeza *total*. Por ejemplo, los electrones son tan diminutos que, no importa cómo se mida su comportamiento, la manera de medir afecta a dicho comportamiento. Si se proyecta luz sobre un electrón para poder «verlo», se altera inevitablemente su velocidad o su posición. Como dijo Bohr: «Cualquier observación que concierna al comportamiento del electrón en el átomo tendrá como consecuencia un cambio en el estado del átomo». Pero sin servirnos de nada para medir el electrón no podemos «verlo» en absoluto —en otras palabras, ¡no podemos saber nada de él! Era posible medir experimentalmente el momento de una partícula subatómica, pero no determinar a la vez su posición. Asimismo, se podía realizar un experimento con el fin de determinar su posición, pero entonces no se podía medir también su momento. Esta era la indeterminación básica del principio de indeterminación de Heisenberg.

Pero no fue la brillante joven generación de científicos europeos en exclusiva la responsable de los asombrosos progresos de la mecánica cuántica a mediados de la década de los veinte. Bohr seguía produciendo su propio trabajo creativo. En 1927 postuló el «principio de complementariedad», que explicaba la dualidad posición/momento señalada por Heisenberg. Según la teoría de Bohr: «la evidencia obtenida bajo diferentes condiciones experimentales no puede ser abarcada por un solo esquema, sino que debe considerarse complementaria en el sentido de que solo la totalidad de los fenómenos agota la información posible sobre el objeto». En otras palabras, no puede haber un esquema general único, pero podemos utilizar una

serie de esquemas complementarios para abarcar un mismo terreno. Estos no presentan contradicciones lógicas entre sí porque sus ámbitos de validez no se superponen.

Esto se ocupaba efectivamente también de la dualidad onda/partícula. Según el principio de complementariedad de Bohr, el que un ente se comporte como onda o como partícula depende simplemente del aparato que se utilice para medir su comportamiento.

Pero quedaban cuestiones importantes sin respuesta. Incluso después de reunir toda la información posible de todos los experimentos posibles, no era suficiente para realizar predicciones precisas. En el nivel cuántico nunca se podía saber *exactamente* qué iba a ocurrir a continuación, como se puede saber en la física clásica. Era posible medir con extrema precisión el momento de una partícula subatómica, y podía determinarse su posición con parecida precisión, pero no podían hacerse las dos cosas *al mismo tiempo*. Pero solo haciendo ambas cosas simultáneamente era posible realizar una predicción exacta de cómo se comportaría a continuación. Tal precisión era imposible en el nivel cuántico. La mecánica cuántica trabajaba con probabilidades: solo se podía predecir la probabilidad de que algo ocurriera.

Bohr se enfrentó a estas objeciones como sigue. De acuerdo, a nivel cuántico era imposible hacer predicciones precisas como las que se pueden hacer con fenómenos de mayor escala, pero aun así la mecánica cuántica era capaz de hacer predicciones sorprendentemente precisas por medio de las probabilidades. Tomando grandes muestras de electrones podía predecirse el curso general de su comportamiento futuro. Podía ser imposible predecir dónde estaría un único electrón en el futuro, pero era posible predecir con considerable precisión la pauta general de comportamiento de un grupo numeroso de electrones. Tales probabilidades eran más estadísticas que individuales. Las predicciones a nivel cuántico tenían que depender de la estadística y de la probabilidad, quizá no tan simples y precisas como la mecánica clásica, pero por lo general igual de efectivas.

Esto se aplicaba a todo tipo de fenómenos subatómicos, desde las líneas espectrales a la radiactividad. Por ejemplo, en la radiactividad el núcleo atómico se desintegra y emite una partícula alfa. La teoría cuántica seguía siendo incapaz de predecir

exactamente *cuándo* un núcleo determinado se desintegraría y emitiría una partícula alfa. Sin embargo, por medio de las probabilidades era posible saber que un grupo de átomos radiactivos emitiría partículas alfa *a cierta velocidad*.

En 1929 Bohr inició una serie de conferencias anuales en el Instituto. A ellas asistieron los mejores jóvenes científicos de Europa, muchos de los cuales habían pasado ya alguna temporada trabajando en el Instituto. Aquí se discutieron los problemas de la mecánica cuántica, problemas de inmensa complejidad al borde mismo del conocimiento científico. Al final de cada conferencia el acuerdo estaba lejos de ser unánime, pero el alma de las conferencias hacía lo posible por poner las cosas en su lugar. El insistente y serio Bohr, fumando en pipa, tenía una manera de superar a sus oponentes por la mera persistencia de sus argumentos cuando estaba seguro de tener la razón. Esto no daba resultado con el distraído Pauli, que se encerraba en sí mismo y seguía con sus propios pensamientos sin importar el rato que Bohr estuviera perorando.

Con otros era diferente. Heisenberg, al que no le faltaba carácter y que podía sentirse igualmente seguro de tener la razón, se vio reducido a lágrimas de frustración en cierta ocasión. (Más tarde arreglaron las cosas conviniendo en que el principio de indeterminación y el de complementariedad eran la misma cosa expresada de maneras diferentes). Cuando la cosa iba demasiado lejos hasta para Bohr, se levantaba de su asiento de repente y salía al jardín. Los otros contemplaban cómo encendía un gran puro y se aplicaba con energía a «arrancar malas hierbas» de las parcelas de flores meticulosamente cuidadas del Instituto, que en ocasiones quedaban convertidas en baldíos para cuando terminaba una conferencia.

Las discusiones eran feroces y las posturas a menudo inamovibles, pero tenían lugar en un ambiente de cooperación internacional. Todos los presentes sentían que estaban tratando de aproximarse a la verdad. En esto consistía la ciencia y esa era la ocupación de los científicos. Las conferencias del instituto de Bohr estaban lejos de ser un fenómeno único: era una época de grandes conferencias científicas internacionales, y no era raro que una veintena de luminarias se reuniera para discutir algún tema científico particular. Quizá las más conocidas de todas fueron las célebres conferencias Solvay celebradas en el Hotel Metropol de Bruselas. Fueron

financiadas por el químico industrial belga Ernest Solvay, dueño de una fortuna gracias al proceso de amoniaco y sosa (utilizado en la manufactura de vidrio y jabón). En estas reuniones Bohr tuvo que defender sus posturas contra figuras de la talla de Einstein (que había recibido el Nobel precisamente por su trabajo sobre la teoría cuántica), Madame Curie (pionera de la investigación de la estructura atómica con su descubrimiento de la radiactividad), y el pugnaz físico austriaco Erwin Schrödinger. Einstein y Curie seguían convencidos de que la cuántica era un fenómeno pasajero, un intento teórico de ofrecer un contexto que abarcara anomalías que algún día quedarían resueltas. No así Schrödinger, que parecía decidido a destruir la cuántica, pero desde dentro.

Schrödinger tenía suerte de que le admitieran en las conferencias. Su excéntrica costumbre de viajar vestido de montañero, con botas, mochila y todo le creaba ocasionales dificultades para pasar la puerta del elegante Hotel Metropol, pero Schrödinger se las podía arreglar con porteros y más. Cuando Heisenberg presentó su mecánica de matrices en 1925, Schrödinger la descalificó de inmediato y presentó su propia «mecánica de ondas» alternativa. (Esto soltó el zorro en el gallinero, como quería Schrödinger, hasta que se demostró luego que era matemáticamente equivalente a la mecánica de matrices de Heisenberg). Más difícil de resistir fue el ataque de Schrödinger contra el enfoque probabilístico de la predicción en la cuántica. Era un sinsentido odioso, declaró con su habitual estilo. Y luego procedió a abrir un feo agujero en la predicción de probabilidades. Lo hizo por medio del famoso, o infame ejemplo conocido como «el gato de Schrödinger». Schrödinger imaginó un gato dentro de una caja sellada.

Dentro de la caja hay también una fuente radiactiva, un martillo, y una botella sellada de gas venenoso. Cuando el núcleo atómico de la fuente radiactiva se desintegra, libera una partícula alfa, que suelta el martillo, que rompe la botella, de la que sale el gas venenoso que mata al gato.

La teoría cuántica no podía predecir lo que haría cualquier átomo radiactivo individual, sino solo a qué *velocidad* general se descompondrían los átomos, es decir, el ritmo al que los átomos de la fuente radiactiva emitirían partículas alfa. Digamos que predice una probabilidad del 50% de que emita una partícula alfa por

minuto. Aplicando a la caja la teoría cuántica, esto significa que pasado un minuto el gato no está del todo vivo ni del todo muerto, lo cual es, cómo no, ridículo.

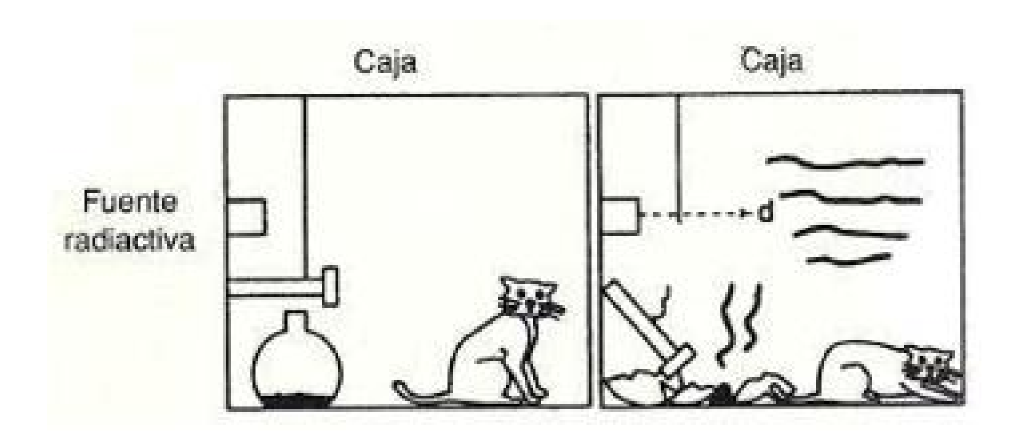


Figura 10

El gato de Schrödinger atacaba también la noción central de la teoría cuántica, la de que un fenómeno no tiene validez hasta que se mide (y *cómo* se mida puede determinar *qué* es, onda o partícula). Desde este punto de vista, pasado un minuto el gato de Schrödinger está en un estado intermedio, ni vivo ni muerto, *hasta que alguien abra la caja y mire*. Solo *entonces* (es decir, en el momento de medir) tomará un valor (vida o muerte). Esto es evidentemente falso.

El gato tiene que estar o bien vivo, o bien muerto, sin que la medición tenga nada que ver en ello. Schrödinger estaba convencido de que como historia de terror, su bestia de los muertos vivientes sería más de lo que podrían resistir la predicción cuántica y su enfoque de «sin medida no hay valor». Pero no lo fue. Pese al absurdo del gato de Schrödinger la mecánica cuántica sigue recurriendo a su método de predicción e insistiendo en que un fenómeno no tiene valor hasta que se mide. Asimismo, el principio de complementariedad (otro objeto del escarnio de Schrödinger) sigue siendo por lo general la posición estándar de la mecánica cuántica.

Algunas derivaciones del principio, sin embargo, no han resistido la prueba de los años. El principio de complementariedad se le subió un poco a la cabeza a Bohr, y empezó a verse a sí mismo como el gran anciano venerable del saber (no solo de la ciencia). Vio correctamente que el principio de complementariedad era aplicable

fuera de la mecánica cuántica. En biología, por ejemplo, hay dos enfoques. Los fenómenos biológicos se pueden clasificar desde un punto de vista funcional (como cuando decimos que el homo sapiens es un zooide grupal) o ser estudiados en términos de análisis físico y químico (por ejemplo: la vitamina C es esencial para mantener la vida del organismo humano). En lugar de ver estos dos enfoques como opuestos, Bohr decía que era mejor considerarlos complementarios. Luego extendió el concepto a las arenas más movedizas de la sociología. En este terreno sugirió que deberíamos considerar el estudio del comportamiento humano y el (aparentemente opuesto) análisis de la transmisión hereditaria como complementarios a la hora de determinar los componentes principales de una cultura. Como cualquier otra cosa relacionada con esta supuesta ciencia, la sugerencia de Bohr era cuestionable. (La escapada sociológica de Bohr le condujo a peligrosas especulaciones raciales, pero hay que remarcar que estas no se parecían en nada a las peligrosas teorías que estaban surgiendo al mismo tiempo al otro lado de la frontera, en Alemania). Bohr no hizo el ridículo de verdad hasta que aplicó su principio a la filosofía.

El principio de complementariedad suscita una cuestión importante para la epistemología (la teoría del conocimiento o fundamento filosófico que tenemos para afirmar que sabemos una determinada cosa), pero afirmar, como hizo Bohr, que los antiguos filósofos en realidad estaban esforzándose por llegar a expresar su principio parece una tontería. La física cuántica es un problema genuino para la filosofía. De hecho, cualquier filosofía que no la tenga en cuenta (caso de muchas) ocupa el mismo lugar que las obras de los antiguos filósofos. Son antigüedades fascinantes, pero inadecuadas para la experiencia contemporánea. En cualquier caso la física cuántica (y con ella el principio de complementariedad) no puede *ser* filosofía. Es ciencia, que a su vez, es conocimiento humano. La filosofía (en este caso la epistemología) estudia los *fundamentos* del conocimiento humano.

La filosofía puede no tener casi nada que decir hoy en día (así como la ciencia lo tiene todo que decir) pero siempre será «más profunda» que la ciencia en este sentido.

Incluso en manos de alguien como Bohr. Por una vez le había fallado la profundidad a este brillante pensador conceptual, uno de los mejores del siglo.

Como comentó uno de sus colegas en privado, Bohr estaba tan dotado para la filosofía como para la carretera: «Era un acto de fe sentarse en un automóvil conducido por Bohr». Si tenía calor, simplemente soltaba el volante y se quitaba la chaqueta como si estuviera sentado en una silla. Se salvaron muchas vidas gracias a que su esposa siempre insistía en sentarse a su lado para agarrar el volante en caso de necesidad. (Pese a la fuerza del argumento filosófico contra Bohr, ciertos avances recientes de la física cuántica tienden a apoyar su postura. Hay científicos que afirman, con cierta justificación, que la física cuántica ha secuestrado a la epistemología, dejando a la filosofía desnuda como el rey en su traje nuevo. Pero queda la cuestión inevitable de que la ciencia y la filosofía no son la misma cosa). Por suerte, Bohr solo ejerció como gurú a tiempo parcial, y siguió haciendo importantes contribuciones a la ciencia. Al igual que muchos de sus colegas, dedicó ahora su atención al núcleo del átomo. A finales de los años treinta presentó un modelo que describía la composición del núcleo atómico y su funcionamiento. Este esquema teórico ayudó a aclarar muchas de las ideas conflictivas que emergían como resultado de unas técnicas experimentales en rápido desarrollo. De nuevo, observó el comportamiento nuclear en términos de mecánica cuántica.

Bohr consideraba que el núcleo consistía en un grupo de partículas que mantenían su cohesión gracias a fuerzas de corto alcance, de modo similar a las moléculas de una gota de líquido. Cuando una partícula choca con este núcleo/gota, su energía es rápidamente absorbida entre las partículas en colisión, y se convierte en parte de la gota, que como resultado se calienta. Este estado durará un tiempo largo (en términos nucleares) durante el cual la energía contenida seguirá fluctuando al azar. El núcleo se descompondrá solo cuando la energía fluctuante en aumento provoque una concentración de energía sobre una partícula que permita a esta escapar, de modo comparable a la evaporación que tiene lugar en una gota a la que se aplique calor. Sin embargo, en el caso de núcleos grandes y pesados (como el del uranio), la partícula que escapa provocará la división de la gota en dos mitades de similar tamaño. (Este proceso se denomina fisión nuclear). Bohr fue el primero en describir lo que ocurre durante la fisión nuclear. Lo hizo en 1939, justo después de que fuera descubierta como resultado de un programa experimental realizado por el físico alemán Otto Hahn y su colega judeo-alemana Lise Meitner, quien tuvo que huir de

la Alemania nazi en pleno trabajo. Hahn, una vez completados los experimentos, envió secretamente los resultados a Suecia, donde Meitner los analizó y se dio cuenta de que había tenido lugar la fisión nuclear.

De ello informaron a Bohr, quien de inmediato se percató de las tremendas implicaciones del hecho. Durante una visita a los Estados Unidos aquel mismo año, advirtió a Einstein de que la Alemania nazi disponía de los conocimientos teóricos necesarios para iniciar investigaciones encaminadas a la fabricación de una bomba atómica. Como resultado Einstein escribió al presidente Roosevelt, quien rápidamente puso en marcha el Proyecto Manhattan con el objetivo de hacer antes una bomba atómica norteamericana.

En 1940 Dinamarca fue ocupada por la Alemania nazi, pero Bohr hizo todo lo posible por mantener la integridad del Instituto. La era de la cooperación científica internacional abierta había pasado hacía ya tiempo, por mucho que siguiera habiendo cooperación científica encubierta. Bohr permaneció secretamente en contacto con científicos británicos, y en 1941 recibió la visita de su antiguo colega Heisenberg, cuya relación con Bohr se había enfriado un tanto a consecuencia del desarrollo de los acontecimientos. Heisenberg fue uno de los pocos científicos de primera fila que se quedaron en la Alemania nazi. Su trabajo en el campo de la «ciencia judía» (es decir, la física teórica) le supuso ser vilipendiado en los círculos científicos nazis, en los que era calificado de «judío blanco». Sin embargo, se le ofreció un puesto dirigente en el programa de la bomba atómica alemana, y lo aceptó. En su encuentro con Bohr en el Copenhague ocupado, Heisenberg entregó a Bohr un diagrama críptico que revelaba lo avanzado del programa atómico nazi. (El diagrama no era de la propia bomba, sino de un prototipo de reactor que no acababa de funcionar). Los motivos de Heisenberg siguen siendo objeto de acalorado debate. Heisenberg diría más tarde que su deseo era influir a los científicos de ambos bandos para que abandonaran sus trabajos sobre la bomba. Bohr pensaba de otro modo, y quedó profundamente afectado por el encuentro (de nuevo, las opiniones difieren sobre sus *motivos* para estar disgustado). Bohr y su antiguo alumno favorito no superarían nunca lo que ocurrió en esta reunión.

En septiembre de 1943 Bohr supo que a causa de su abierto desprecio por los nazis iba a ser arrestado. Se organizó un rápido plan de huida. Bohr y su familia fueron a

una casa de los suburbios de Copenhague. Al anochecer atravesaron a gatas un campo hasta una playa desierta. Aquí fueron recogidos por un barco pesquero que cruzó los quince kilómetros del estrecho hasta la Suecia neutral, pasando de largo frente a las patrulleras alemanas.

Al llegar, Bohr fue conducido rápidamente a Estocolmo. En cuanto se descubrió su huida, el servicio secreto alemán recibió orden de asesinarlo en cuanto se le encontrara. Aunque Estocolmo estaba infestado de agentes alemanes, y había muchos simpatizantes de Alemania en puestos influyentes, Bohr se las arregló para conseguir una audiencia con el rey. Antes de su huida había oído que estaba a punto de empezar el traslado de los judíos daneses a los campos de concentración. Pudo persuadir al rey de Suecia para que, poniendo en peligro la neutralidad sueca, protestara públicamente contra esta grotesca violación de los derechos humanos. (En parte gracias a esto, pero en mayor medida debido al ingenio y a la valentía daneses, solo quinientos de los ocho mil judíos daneses serían trasladados).

Varios días después el gobierno británico envió un bombardero mosquito sin insignias a Suecia para recoger a Bohr. Los agentes alemanes sabían ya del bombardero, sabían dónde estaba Bohr, y estaban decididos a hacer todo lo posible por evitar su encuentro. Tras una serie de aventuras y accidentes dignos de James Bond, Bohr fue por fin secretamente depositado en el depósito vacío de las bombas del mosquito, que despegó aprovechando la oscuridad. Consiguió eludir a la Luftwaffe al sobrevolar la Noruega ocupada y llegó al Mar del Norte. Para entonces Bohr, que contaba cincuenta y siete años de edad, corría peligro de morir congelado.

Cuando el mosquito aterrizó por fin en Inglaterra, le sacaron casi inconsciente por la hipotermia y la falta de oxígeno. Apenas había pasado en Inglaterra el tiempo suficiente para entrar en calor (cosa que llevaba un tiempo dada la escasez de combustible en la Gran Bretaña en guerra) fue embarcado hacia los Estados Unidos. Aquí se unió de inmediato al Proyecto Manhattan, viajando a los laboratorios secretos de Los Álamos donde se construía la bomba. El físico norteamericano Robert Oppenheimer, máximo responsable del proyecto, le dio la bienvenida, y Bohr pudo enseñarle a él y a sus colegas el diagrama que le había pasado Heisenberg, pero esto no acabó de tener el efecto tranquilizador que había pretendido. Para los

americanos era obvio que tal reactor no funcionaría, pero creían que esto tendría que ser obvio también para los alemanes. O eso, o el diagrama entregado por Heisenberg era una elaborada cortina de humo destinada a ocultar los verdaderos progresos realizados. (Sigue siendo un misterio. El hecho es que el proyecto alemán de bomba atómica nunca acabó de despegar. En qué medida esto podría deberse a los deliberados esfuerzos de Heisenberg, es aún materia de feroz discusión). Las primeras dos bombas atómicas estadounidenses fueron lanzadas sobre las ciudades japonesas de Hiroshima y Nagasaki en agosto de 1945, poniendo el punto y final a la segunda guerra mundial. Bohr había participado en la creación de la bomba atómica, y quedó horrorizado por sus efectos. Empezó inmediatamente a utilizar su prestigio para presionar desde las esferas más altas con el fin de que se detuviera sin demora toda investigación sobre bombas atómicas. Su empeño fue recibido con rechazo, en el mejor de los casos. (Churchill era partidario de encerrarle). En 1945 Bohr volvió a Copenhague y a su amado Instituto. Los nazis no habían sabido muy bien qué hacer con el principal instituto del mundo especializado en ciencias racialmente inaceptables, con lo cual Bohr encontró las cosas más o menos como las había dejado, entre ellas un bote de solución de ácido áurico por el que sentía gran estima. Según cuenta la historia, cuando Bohr huyó de Dinamarca en 1943 estaba decidido a que su medalla de oro del premio Nobel no cayera en manos de los nazis. Para impedirlo la disolvió en ácido, y dejó un discreto bote de líquido turbio en una estantería de laboratorio poco conspicua.

Al volver, precipitó el oro y refundió la medalla. Una anécdota de exquisito simbolismo poético, cómo no, demasiado perfecta para ser cierta, pero por muy poco. La medalla de oro del Nobel no era de Bohr en realidad: la suya la había donado al fondo finlandés en compensación por daños de guerra. En realidad pertenecía a su antiguo compañero y colega científico Von Laue, quien se la había mandado a Bohr para que la guardara al comienzo de la época nada dorada de Alemania. (Su medalla no fue lo único que Von Laue estuvo a punto de perder. A diferencia de Heisenberg, Von Laue había hecho pública su opinión sobre los nazis. Lo cierto es que los ganadores del Nobel se convirtieron en una especie amenazada en la Alemania de entonces. En un ataque de pique, Hitler había prohibido aceptar el Nobel a los alemanes porque varios de los ganadores alemanes anteriores, tales

como Einstein, Planck, Heisenberg, Hertz, Thomas Mann y otros, eran todos inaceptables para la raza superior). Después de la guerra Bohr siguió con su trabajo en el Instituto, ahora con el apoyo de su hijo Aage (luego también ganador del Nobel por su ulterior desarrollo del modelo «gota» del núcleo atómico). Tras la muerte de Einstein en 1955, a Bohr le fue impuesta la toga de «mayor científico vivo», pero hizo buen uso de este absurdo organizando una campaña para la puesta en común internacional de los conocimientos sobre la fisión nuclear. En su opinión esto impediría el desarrollo de bombas atómicas aún más destructivas. Curiosa lógica, que por desgracia no convenció a lógicos como Jruschov y Eisenhower.

Niels Bohr murió en 1962 a la edad de setenta y siete años. Qué rareza, un hombre grande y bueno. Como tal fue honrado por su pueblo, y su Instituto fue rebautizado como Instituto Bohr.

Capítulo 2
Caprichos y quarks del mundo cuántico

- «Si alguien dice que la teoría cuántica está clara, es que no la entiende». Niels Bohr
- La cuántica es el equivalente científico del cubismo, que contempla un objeto desde varias perspectivas al mismo tiempo. La teoría cuántica y el cubismo se desarrollaron a la vez, pero de forma independiente. Se ha sugerido que al comienzo del siglo XX nuestra evolución dio un «salto» en la manera de ver el mundo.
- Un quark es una partícula cualquiera de un grupo determinado de partículas elementales. La cromodinámica cuántica sugiere que puede haber hasta dieciocho tipos diferentes de quark. Entre estos tipos (conocidos como sabores) se encuentran los siguientes: arriba, abajo, extraño, encantado, fondo (o belleza) y cima (o verdad). El término quark fue acuñado por el físico norteamericano Murray Gell-Mann a partir de una palabra inventada por James Joyce en su incomprensible obra maestra *Finnegan's Wake*, obra que un crítico describió como «un salto cuántico hacia la oscuridad».
- «El multiculturalismo es un concepto cuántico». *New Scientist*
- Definición de enciclopedia: «El pluralismo es la creencia en la coexistencia de concepciones incompatibles (...) gradualmente ha ido calando en todos los aspectos de la cultura, sociedad, e incluso del conocimiento del siglo XX...».
- Einstein mostró que, en último término, el Universo no se compone de materia. Las partículas menores son energía. Vistos así, todos los objetos físicos se convierten en espacio cargado de fuerza.
- «En esencia, la cuántica es ciencia más allá de los sentidos. No podemos tener una *imagen* de la realidad última». Heisenberg
- «Estoy tan seguro como se puede estar de algo que nunca se podrá conocer de que la realidad es más extraña de lo que nunca podremos llegar a concebir». Bryan Magee, filósofo contemporáneo
- «Profunda aversión hacia el reposo definitivo en una u otra visión totalizadora del mundo. Fascinación por el punto de vista opuesto: negativa a privarla del

estímulo de lo enigmático». La prescripción de Nietzsche para el futuro de la ciencia en *1886*. También dijo: «Las intuiciones más valiosas son los *métodos*».

- «La segunda ley de la termodinámica postula que nunca podrá haber otro Humpty Dumpty. La física cuántica ha hecho que una "teoría del todo" sea tan plausible como Papá Noel». John Mandeville, físico
- Unas palabras de advertencia para aquellos que buscan una explicación última del mundo en términos de conocimiento: «No quieras hacer del intelecto nuestro dios; tiene (...) poderosos músculos, pero ninguna personalidad». Einstein
- Un desarrollo tardío de la física cuántica (versión simplificada): Imaginemos dos partículas subatómicas. En determinado momento esta pareja forma un sistema en el que el valor de una equilibra el valor de la otra (digamos: A\, B/). Luego estas partículas quedan separadas por una distancia enorme (digamos medio Universo). Entonces medimos A y comprobamos que tiene valor \. Por tanto concluimos que B debe tener valor /. Hasta aquí, muy simple.
- Pero según la teoría cuántica, A *no tiene valor hasta que se mida*, y dicho valor depende del método de medida empleado. Esto supone que cuando se mide A y se halla que es \, B, por haber sido parte una vez del mismo sistema, debe asumir el valor /. Tendría que haber tomado este valor de manera instantánea.
- Por tanto, si la teoría cuántica es cierta, hay algo que viaja más deprisa que la luz. Pero como sabemos, según la teoría de la relatividad de Einstein no hay nada capaz de hacer eso. Asimismo, este «ordenamiento» (o equilibramiento de B a través de una gran distancia) tendría lugar sin causa aparente. Estaría más allá del ámbito de la causalidad. Este fenómeno se conoce como la Paradoja EPR.
- Hubo un desarrollo ulterior de la Paradoja EPR con la llegada del Teorema de la Desigualdad de Bell. Este explicaba la Paradoja EPR suponiendo una «realidad no local» (es decir, un mundo real que existe en ninguna parte). El mundo real que *conocemos* se apoya en esta realidad invisible que está más

allá del tiempo, el espacio o la causalidad. Según Bell, todas las partículas que alguna vez hayan sido parte de un sistema permanecerán siempre ligadas por esta realidad no local, a la que no le afecta la distancia (por grande que sea) que actúa de manera instantánea (es decir, más rápido que la velocidad de la luz) y en la que hay lazos que no pasan por el espacio.

- No es la primera vez que se ha hablado de un método tal de comunicación. La transferencia de pensamiento por percepción extrasensorial funciona así. También el vudú. Cuando se clava una aguja en el muñeco que representa a alguien que está a kilómetros de distancia, este inmediatamente sufre un dolor penetrante en la parte correspondiente de su cuerpo.
- Sin embargo (...) ¡al Teorema de la Desigualdad de Bell se le llama ciencia!

Capítulo 3
Vida y tiempo de Niels Bohr

1885 — Nace Niels Bohr en Copenhague.

1900 — Max Planck formula por primera vez la teoría cuántica.

1903 — Bohr entra en la Universidad de Copenhague para estudiar física.

1905 — El «annus mirabilis» de Einstein, en el que propone su teoría especial de la relatividad y confirma la teoría cuántica de Planck.

1911 — Bohr completa su tesis sobre la teoría electrónica de los metales, y va a estudiar a Cambridge con J. J. Thomson.

1912 — Bohr se traslada a Manchester para estudiar con Rutherford en marzo. Se casa con Margarethe Norlund en agosto.

1913 — Bohr publica su teoría de la estructura atómica.

1914-16 — Bohr está en la Universidad de Manchester.

1916 — Bohr es nombrado catedrático de física teórica en la Universidad de Copenhague. Einstein publica su teoría general de la relatividad.

1921 — Se inaugura el Instituto de física teórica, con Bohr como director.

1922 — Descubrimiento del hafnio. Bohr recibe el premio Nobel de física.

1924 — Pauli desarrolla su principio de exclusión.

1925 — Heisenberg propone la física de matrices. Schrödinger replica con la mecánica de ondas.

1927 — Heisenberg postula su principio de indeterminación. Bohr propone el principio de complementariedad.

1936 — Bohr concibe el modelo «gota» del núcleo para explicar la fisión nuclear.

1941 — Heisenberg visita a Bohr en el Copenhague ocupado y le entrega un diagrama de un reactor nuclear alemán.

1943 — Bohr escapa de la Dinamarca ocupada.

1943-45 — Bohr trabaja en el Proyecto Manhattan para hacer la primera bomba atómica.

1945 — Se arroja la primera bomba atómica sobre Hiroshima. Bohr regresa a Dinamarca. Inicia una campaña en favor de la cooperación internacional en materia de fisión nuclear.

1962 —Bohr muere en Copenhague.

Otras lecturas recomendadas

- Ruth Moore: *Niels Bohr* (Hodder, 1967 *et seq*). La típica biografía con una buena mezcla de vida y ciencia accesible.
- Abraham Pais: *Niels Bohr's Times* (Clarendon, 1991*et seq*). El estudio biográfico más reciente: completo tanto para la vida como para la obra, sin llegar a ser la última palabra.
- Niels Bohr: *Física atómica y conocimiento humano* (Madrid, Aguilar, 1964). Una introducción al asunto, de la fuente original.
- Arkady Plotnnnisky: *Complementarity* (Dute UP, 1994). Los últimos avances: la nueva metafísica científica que deja muy atrás al sentido común.